

**ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –  
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»**



## **МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ**

Сборник докладов  
девятой научно-технической конференции  
(26–28 октября 2010 г.)

**Саров 2011**

**«Молодежь в науке».** Сборник докладов девятой научно-технической конференции (г. Саров, 26–28 октября 2010 г.), с. 669, ил.

Девятая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» посвящена 65-летию атомной отрасли.

Конференция позволяет молодежи поддерживать научные связи между предприятиями ядерно-оружейного и ядерно-энергетического комплекса, а также способствует привлечению в атомную отрасль студентов ведущих вузов России.

В сборник вошли доклады молодых ученых и специалистов ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», ФГУП ФНПЦ «ПО "Старт" им. М. В. Проценко», ФГУП «ПСЗ», ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «Атомтехэнерго», ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ОАО «Атомэнергопроект», МФТИ, НИЯУ МИФИ СарФТИ, Ульяновского ГТУ.

На конференции молодыми учеными представлены доклады по фундаментальным и прикладным исследованиям и разработкам в различных областях науки и техники.

На секциях «Теоретическая и математическая физика», «Экспериментальная физика», «Инженерные науки», «Информационные системы и технологии» представлены наиболее динамично развивающиеся направления: математическое моделирование и разработка программного управления, ядерная физика, газодинамика, изучение свойств веществ при высоких плотностях энергии, физика лазеров, автоматизированное проектирование сложных систем, технология создания новых материалов и контроль качества технологических процессов, материаловедение, защита информации, информационные системы и технологии, научно-технические и экспериментальные работы по безопасности атомной энергетики и эксплуатации атомных станций.

Авторы-составители: канд. физ.-мат. наук И. Е. Пономарев, Н. Н. Попова, А. С. Ульянов

**Главный научный редактор:** д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев

**Заместитель главного редактора:** канд. физ.-мат. наук И. Е. Пономарев

**Редакционный совет:** д-р физ.-мат. наук А. Е. Дубинов, д-р техн. наук А. П. Мартынов, д-р физ.-мат. наук С. П. Мельников, д-р физ.-мат. наук В. С. Нефедов, д-р физ.-мат. наук В. А. Разуваев, канд. техн. наук О. Г. Алексеев, канд. физ.-мат. наук С. А. Буйко, канд. физ.-мат. наук А. Н. Гребенников, канд. техн. наук А. И. Коршунов, канд. физ.-мат. наук В. А. Раевский, С. Е. Сафронов



# Пленарные доклады

---

---

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ «ВНУТРИЦЕХОВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ДИСПЕТЧИРОВАНИЕ» ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕХОМ

Е. И. Борисова, О. Н. Занькова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одним из главных направлений совершенствования системы управления крупными промышленными предприятиями в настоящее время является разработка и внедрение интегрированных автоматизированных систем управления (ИАСУ). Основная черта ИАСУ – целостность, т. е. комплексное объединение в единое целое отдельных автономных частей системы.

Целью моей работы является проектирование основного модуля ИАСУ цехом «Внутрицеховое планирование и диспетчирование», включающего в себя подсистемы «План производства уровня планово-диспетчерского бюро (ПДБ) цеха» и «План производства уровня участка цеха» и обеспечивающего интеграцию процессов внутрицехового планирования и диспетчирования с другими рабочими процессами цеха на уровне интегрированной информационной среды (ИИС) производства.

Актуальность данной темы определяется работами по созданию, отработке и внедрению технологии сквозного 3D проектирования и моделирования, которые были начаты во ВНИИЭФ в 2009 году, выполнялись в рамках реализации «Концепции создания технологии сквозного компьютерного 3D проектирования и моделирования в РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Проектирование ИАСУ цехом обозначило следующие проблемы:

- информационный обмен как между модулями ИАСУ, так и между внешними автоматизированными и информационными системами;
- выделение и распределение потоков информации между модулями, концентрация информации, поддержка актуальности и целостности информации;
- информационная поддержка изделия на всех стадиях жизненного цикла изделия;
- реализация технологии сквозного 3D-проектирования и моделирования.

Поиск путей решения данных проблем показал, что создание ИАСУ цехом как автономной автоматизированной системы нецелесообразно и невозможно без организации ИИС производства. ИИС представляет собой совокупность удаленных распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах, обеспечивает корректность, актуальность, сохранность и доступность данных для целей управления производством и реализации технологии сквозного 3D-проектирования и моделирования. В ИИС

реализуется главный принцип технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий: информация, однажды возникшая на каком-либо этапе жизненного цикла, сохраняется и становится доступной участникам этапов жизненного цикла в соответствии с правами распределенного доступа к информации.

Создание ИИС производства позволит оптимизировать процессы подготовки производства, производственного планирования и управления, рационального использования ресурсов и, как следствие, повысить эффективность производства.

Исходными данными для ИАСУ цеха являются данные производственного плана завода, ведение которого осуществляется в автоматизированной системе управления (АСУ) «Производственный план завода верхнего уровня» (ППЗ).

ИАСУ цехом включает следующие подсистемы.

*Подсистема подготовки данных* предназначена для выполнения выборки данных из базы данных (БД) производственного плана, выполнения операций пополнения, корректировки БД АСУ цеха, подготовки передачи отчетных данных и корректировок плана в АСУ ППЗ.

*Подсистема внутрицехового планирования и диспетчирования* предназначена для ведения производственного плана цеха, формирования графиков изготовления изделий, формирования производственных планов участков, контроля обеспеченности плана ресурсами, отслеживания процесса выполнения производственного плана и причин отклонений от запланированных сроков изготовления, формирования цеховых отчетов, формирования корректива и дефицита под план.

*Подсистема технологической подготовки производства (ТПП)* предназначена для контроля проведения технологической подготовки производства по позициям производственного плана (разработка технологических процессов, обеспечение изготовления оснастки и т. д.).

*Подсистема материально-технического обеспечения (МТО) и складского учета* предназначена для контроля материально-технического обеспечения позиций плана (анализ обеспеченности позиций материально-техническими ресурсами (МТР), формирование дефицитов МТР, документов для бухгалтерии), а также складского учета товарно-материальных ценностей, комплектующих, готовой продукции.

*Подсистема контроля качества продукции* предназначена для реализации процесса контроля над ходом изготовления (пооперационный контроль, летучий контроль, формирования документов по качеству изготавливаемой продукции).

*Подсистема документооборота* для учета организационно-распорядительной и информационной документации уровня завода и ведения документооборота цеха.

*Подсистема администрирования* предназначена для управления настройкой программного обеспечения (ПО) АСУ цеха, доступом к различным режимам и функциям АСУ (распределенный доступ), защиты БД от несанкционированного доступа, резервного копирования.

При проектировании модуля внутрицехового планирования и диспетчирования были выполнены следующие этапы работ:

- исследование и описание рабочих процессов производственной деятельности цеха, т. е. проведено обследование текущего состояния;

- моделирование рабочих процессов «как есть» в среде;

- выработка решений по оптимизации процессов и построение на их основе модели «как надо»;

- разработка технической документации для проектирования структур БД ИАСУ цехом и разработки ПО на модуль «Внутрицеховое планирование и диспетчирование»;

- проектирование модуля ИАСУ цехом «Внутрицеховое планирование и диспетчирование», являющегося основополагающим компонентом ИАСУ цехом;

- разработка организационной и эксплуатационной документации по вводу в опытную эксплуатацию;

- внедрение в опытную эксплуатацию, обучение пользователей и сопровождение доработки ПО по предложениям пользователей.

В рамках работ по созданию ИАСУ цехом проводилось детальное обследование и описание основных производственных процессов деятельности цеха. Представлены фрагменты описания: таблица перечня операций, спецификация входов/выходов, показатели рабочего процесса «Внутрицеховое производственное планирование цеха».

Построение модели действующих рабочих процессов в цехе позволило выстроить фактическую последовательность выполняемых операций производственных процессов, выявить отклонения реальных процессов от действующих положений, понять причины этих отклонений, создать графические модели процессов, позволившие выявить «неувязки» или дублирование действий участников рабочего процесса, провести анализ эффективности рабочих процессов и спроектировать модели рабочих процессов «как надо». Представлены фрагменты модели процесса внутрицехового производственного планирования в формате BPwin (AllFusion Process Modeler).

Моделирование процесса внутрицехового производственного планирования и диспетчирования определило ряд недостатков хода рассматриваемого процесса. Действующие технологии не обеспечивают возможности оперативного автоматического анализа плана цеха, оперативного доступа к информации о ресурсах цеха, технологической, производственной и другой информации, способствующей быстрому принятию оптимальных решений, оперативной информации о ходе изготовления.

Оптимизация процесса внутрицехового производственного планирования и диспетчирования предполагает автоматизацию этого процесса и интеграцию его с другими производственными процессами в ИАСУ цеха на уровне ИИС производства.

Предложения по оптимизации были реализованы при проектировании модуля «Внутрицехового производственного планирования и диспетчирования».

В рамках работ по созданию ИАСУ разработана структура БД, которая содержит всю необходимую информацию для функционирования ИИС и обеспечивает интеграцию с действующей на заводе АСУ «ППЗ».

Модуль «Внутрицехового производственного планирования и диспетчирования» состоит из двух взаимосвязанных подсистем:

- «План производства уровня ПДБ цеха»;

- «План производства уровня участка цеха».

Подсистема «План производства уровня ПДБ цеха» предназначена для автоматизации процессов управления и диспетчирования производства на уровне цеха, процессов учета и управления ресурсами, а также обеспечения информационной поддержки изделия на стадиях внутрицехового производственного планирования.

Основные функции подсистемы:

- автоматический анализ показателей обеспеченности плана цеха;

- формирование карточки (подробной информации) по выбранной позиции плана;

- автоматическая поддержка актуальности плана цеха;

- мониторинг выполнения плана цеха;

- формирование различных видов отчетов по выполнению плана;

- автоматическая подготовка данных для коррективы плана цеха;

- автоматическая подготовка данных для дефицита материалов и изделий внешней поставки (ИВП);

- автоматическое формирование аналитических данных о текущем состоянии плана на определенный момент времени.

Подсистема позволяет работать с производственным планом цеха и контролировать его выполнение. Производственный план представляет собой перечень позиций в разрезе учетно-плановых единиц (УПЕ) с распределенными по месяцам плановыми количеством и трудоемкостью. Для всех позиций плана анализируется обеспеченность материалами,

конструкторской документацией (КД), ТПП (маршрутные карты (МК), аналоги, ведомости материалов), оснасткой, оборудованием в разрезе факта их наличия и процентного отношения, а также рассчитывается трудоемкость по видам работ. Фактические данные отражаются по каждой позиции плана с распределением по месяцам.

По плану автоматически рассчитываются аналитические данные за определенный период или на данный момент времени следующего характера: количество позиций в плане, количество скорректированных, новых, изготовленных, снятых, приостановленных, измененных, не обеспеченных МТР, КД, ТПП и т. д.

На каждую позицию плана в подсистеме формируется карточка, содержащая развернутый состав позиции в виде дерева и информацию по каждому текущему элементу этого дерева, т. е. сборочной единицы или детали. В карточке отражается следующая информация для составной части:

- плановые и фактические количества и трудоемкости;
- материалы и ИВП, необходимые для изготовления, и вся информация по ним;
- обеспеченность КД и технической документацией;
- межцеховая кооперация (количество, склад, дата изготовления);
- перечень технологических операций из МК, трудоемкость по каждой с учетом штатного количества позиции;
- оборудование, на котором должна выполняться каждая операция МК;
- трудоемкость в разрезе видов работ, как собственная составной части, так и с учетом всех входящих в нее.

На цеховом уровне производственный план недоступен для изменений, так как ведение плана осуществляется на уровне планово-диспетчерского отдела (ПДО) завода. Цех располагает подробной информацией по изменениям плана, которая формируется при обновлении плана. Цех осуществляет ведение плана в части его фактического выполнения.

При возникновении ситуации, когда цех по определенным причинам не может выполнить в плановом периоде ту или иную позицию, формируется корректив цеха и направляется в ПДО для внесения изменений в план. В цеховом коррективе учитываются данные корректив участков.

В случае отсутствия необходимых МТР и ИВП под позицию плана в подсистеме автоматически формируется дефицит материалов и ИВП для направления в отдел материально-технического обеспечения для проработки. Реализована корректировка дефицита в ручном режиме.

Для каждого изделия или составной части изделия реализовано формирование следующих планово-производственных документов: «Ведомость межцеховой кооперации», «Комплектовочно-сопроводи-

тельная ведомость», «Ведомость материалов», «Детально-сборочная ведомость».

Для инженера по подготовке производства разработаны режимы:

– формирование заявки на выдачу материалов, ИВП, комплектующих в производство, по которой кладовщик выдает все необходимое для изготовления на участок;

– запуск в производство, где инженер указывает начальникам участков в развернутом составе позиции плана то, что необходимо запустить на изготовление.

В ходе производства оперативно отслеживается информация о фактических данных по выполнению плана (сроки, трудоемкость, количество по каждой позиции и составной части). В конце месяца формируются следующие виды отчетов: отчет о выполнении работ по УПЕ, отчет цеха о выполнении производственного плана за месяц, отчет по заказам за месяц, отчет о наличии незавершенного производства, отчет о заделах.

Подсистема «План производства уровня участка цеха» предназначена для автоматизации процессов управления и диспетчеризации производства на уровне участка цеха, учета и управления ресурсами, мониторинга выполнения планов участков, сменносуточных заданий, а также обеспечения информационной поддержки изделия на стадиях внутрицехового производственного планирования и изготовления.

Функции подсистемы «План производства уровня участка цеха» следующие:

- автоматизированное формирование (выборка из плана цеха) плана участка;
- автоматическая поддержка актуальности плана участка;
- подготовка данных для формирования корректива плана участка;
- автоматический анализ обеспеченности позиций плана участка;
- мониторинг выполнения плана участка;
- автоматизированное формирование сменносуточных заданий мастерам, бригадам, рабочим участка;
- автоматизированное формирование нарядов на выполнение работ;
- ведение архива нарядов;
- автоматизированное формирование сопроводительного паспорта;
- ведение архива сопроводительных паспортов;
- автоматизированное формирование предъявительской записки.

На основе производственного плана цеха и данных МК автоматически формируется производственный план для каждого участка цеха. В план участка включаются позиции плана цеха в разрезе УПЕ, в выполнении работ по которым он принимает участие (на основе закрепления выполняемых операций за участками в МК).

По каждой позиции плана отражается состав в разрезе сборочных единиц и деталей, в изготовлении

которых участвует рассматриваемый производственный участок. Состав дополнен информацией о количестве, трудоемкости, сроке изготовления, цехах-кооператорах, ссылками на конструкторско-техническую документацию. Для запуска на изготовление рационального количества сборочных единиц и деталей рассчитано суммарное плановое количество аналогичных сборочных единиц и деталей по всей рассматриваемой позиции плана.

Для каждой составной части позиции плана отражается информация о потребности в материалах, ИВП, комплектующих и их наличии на складах цеха.

Актуальность плана участка поддерживается посредством актуализации плана цеха. Пользователи анализируют и прорабатывают изменения по протоколу корректировок, формирующегося по изменениям. Каждому участку доступна информация только по закреплённым за ним позициям плана.

При возникновении необходимости корректировки позиций плана формируется корректив участка, который отражается в дальнейшем в коррективе цеха.

На основе производственного плана участка, представленного в разрезе составных частей, начальник участка назначает сменные задания мастерам. Возможность анализировать плановое количество и сроки изготовления идентичных позиции плана позволяет пользователю определить оптимальную партию запуска в производство сборочных единиц или деталей на текущий момент времени.

На основе сменных заданий мастер распределяет сменные задания конкретным исполнителям или бригадам.

По каждому заданию либо по группе идентичных автоматически формируется наряд на выполнение работ.

Фактические данные заполняются инженером по нормированию труда в части фактического времени на задание и данных табеля фактически отработанного времени, контролером отдела технического контроля – в части количества годных (без брака) и дефектных деталей или сборочных единиц. Фактические данные анализируются и отражаются в журнале сменных заданий исполнителей, в журнале сменных заданий мастера, по каждой технологической операции составной части позиции плана участка, по составной части позиции плана участка, по позиции плана участка, по позиции производственного плана цеха.

При запуске в производство на деталь или сборочную единицу формируются протокол изготовления и сопроводительный паспорт. Данные паспорта заполняются автоматически (данные по позиции и материалы), МК (технологические операции), но в процессе прохождения по маршруту изготовления дополняется фактическими данными по изготовлению.

Дополнительно в подсистеме реализована возможность формирования предьявительской записки

при предъявлении изготавливаемой сборочной единицы или детали на контроль ОТК, возможность просмотра инструкций по изготовлению для каждой составной части. В подсистеме реализованы режимы работы с архивом нарядов на выполнение работ и архивом сопроводительных паспортов.

Интеграция рассматриваемых подсистем реализована на уровне данных, а именно, ведение единого производственного плана цеха, распределённый доступ к данным в зависимости от выполняемых функций, ввод исходных и фактических данных на уровне тех функциональных служб цеха, где они создаются.

Основные направления интеграции:

- производственные планы участков являются выборкой из единого производственного плана цеха, который ведётся на уровне ПДБ;

- поддержка актуальности производственного плана цеха осуществляется на уровне плана ПДБ цеха, участки располагают подробной информацией по корректировке, приостановке, дополнению позиции плана участка;

- фактические данные по изготовлению составных частей позиций плана цеха, выполнению конкретных технологических операций заполняются и анализируются при ведении плана участка цеха и отражаются на уровне производственного плана цеха;

- перечень позиций плана, которые цех не может изготовить в текущем плановом периоде, с указанием конкретных причин отклонений автоматически формируется на основе данных участков;

- формирование сводных отчетных данных и форм по выполнению плана цеха осуществляется в подсистеме производственного плана уровня ПДБ на основе данных с участков.

В перспективе запланирована интеграция модуля «Внутрицехового производственного планирования» с модулями ИАСУ цехом в следующих направлениях:

- обеспеченность ТПП запланированных позиций;

- своевременное обеспечение изготовления материалами, ИВП, комплектующими со склада цеха;

- оперативный контроль качества выпускаемой продукции.

Модуль «Внутрицехового производственного планирования» позволяет автоматизировать производственное планирование и диспетчирование уровня цеха, обеспечивает мониторинг и координацию этапов выполнения производственного плана цеха, информационную поддержку изделия на стадиях производственного цикла изготовления.

Разработанное ПО находится в опытной эксплуатации в цехе завода.

Создание и успешное внедрение ИАСУ цехом является важным этапом организации и информационного наполнения ИИС производства.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОСКОЛОЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ ПРЕГРАДЫ

М. В. Здорова, С. В. Копкин, М. В. Ветчинников, И. А. Давыдов, Е. А. Пронин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Во многих инженерных задачах возникает необходимость определения стойкостных характеристик некоторых конструкций к ударно-пробивному воздействию. В настоящее время возможности по экспериментальному моделированию высокоскоростных соударений (скорость удара  $\sim 4-7$  км/с) весьма ограничены, во-первых, по экономическим причинам и, во-вторых, из-за фиксирования небольшого набора данных, по которым трудно проследить всю динамику процесса в рассматриваемых системах. По этим причинам, а также в силу современных возможностей вычислительной техники, очевидной становится полезность применения численного моделирования к задачам соударения для более детального их изучения. В результате расчетов можно получить очень подробную картину деформации конструкций.

Исследования высокоскоростного пробивания преград поражающими элементами ведутся в ИТМФ с 1990-х годов. Двумерные и трехмерные расчеты рассматриваемых ниже модельных экспериментов (или аналогичных им) проводились в самых разнообразных математических методиках [1, 2]. В данной работе по методике МД (Молекулярная Динамика) методом кластерной динамики (КД) [3] рассматриваются задачи высокоскоростного соударения стального шарика с многослойной преградой.

Цель работы (результат) – адаптация программы МД, отработка технологии проведения расчетов

задач пробивания методом КД, проведение трехмерных расчетов пробивания преград до времен экспериментального рентгенографирования, получение картины поврежденности и количественное сравнение полученных результатов с экспериментом и аналогичными расчетами по другим методикам.

## 1. Постановка и краткие результаты экспериментов

Эксперименты по обстрелу плоских преград были проведены в 1991 г. на легкогазовой установке, где поражающий элемент, в зависимости от его массы, может быть разогнан до скоростей  $\sim 7$  км/с [4]. Преграды представляли собой набор плоских пластин размерами  $300 \times 300$  мм. Поражающим элементом являлся стальной шарик массой 10 г и диаметром  $\approx 13,5$  мм.

На рис. 1 приведены физические схемы опытов по пробитию двухслойных (серия № 1) и семислойных (серия № 2) преград.

Опишем начальные условия проведенных опытов и их краткие результаты (на время  $t_\gamma$ , отсчитываемое от момента касания преграды).

**Опыт № 1:**  $d_{\text{текстолит}} = 10$  мм, угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $V_0 = 4,2$  км/с,  $t_\gamma = 28,9$  мкс.

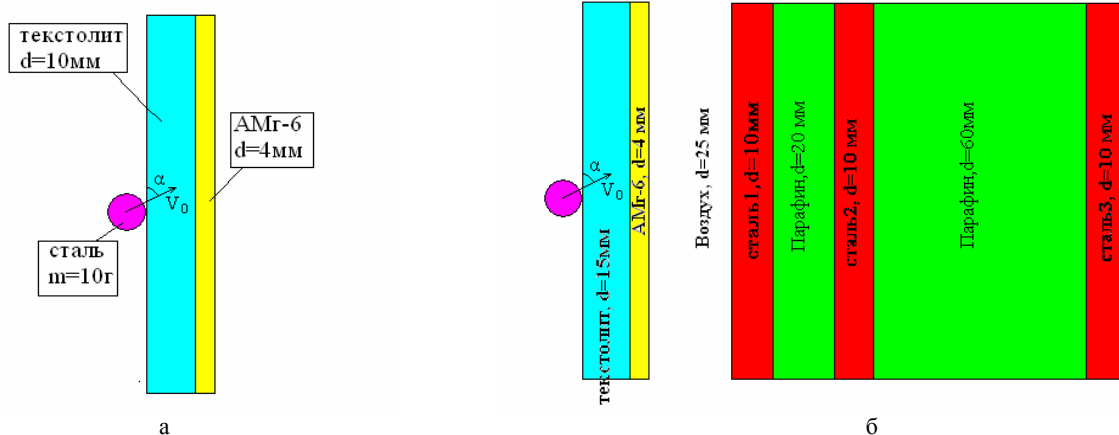


Рис. 1. Физическая схема опытов (а) – серия № 1; (б) – серия № 2

В текстолите пробито круглое отверстие диаметром  $\sim 70$  мм, вокруг отверстия вспучивание и отслоение материала в зоне диаметром  $\sim 140$  мм. В слое АМГ-6 пробито круглое отверстие, диаметр которого на свету  $\sim 100$  мм, края отверстия отогнуты внутрь, по краю отверстия образовалось 9 лепестков высотой  $\sim 50$  мм.

**Опыт № 2:**  $d_{\text{текстолит}} = 10$  мм, угол  $\alpha = 45^\circ$ ,  $V_0 = 4,17$  км/с,  $t_\gamma = 36,7$  мкс.

В текстолите пробито отверстие размерами  $\sim 65 \times 75$  мм, в слое АМГ-6 – отверстие размерами  $\sim 75 \times 100$  мм с развитыми по краям 9 лепестками высотой  $\sim 45$  мм.

**Опыт № 3:**  $d_{\text{текстолит}} = 10$  мм, угол  $\alpha = 60^\circ$ ,  $V_0 = 4,03$  км/с,  $t_\gamma = 43,7$  мкс.

В текстолите пробито овальное отверстие размерами  $\sim 80 \times 90$  мм, в слое АМГ-6 – отверстие размерами  $\sim 100 \times 110$  мм с развитыми по краям 9 лепестками высотой  $\sim 50$  мм.

На рис. 2 приведены рабочие рентгенограммы первой серии опытов.

**Опыты № 4, 5:**  $d_{\text{текстолит}} = 15$  мм, угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $V_0 = 6,75$  км/с.

На момент  $t_\gamma = 17,2$  мкс (опыт № 4): в слое АМГ-6 пробито отверстие диаметром  $\sim 57$  мм, слои наружных оболочек углубились в парафин на 14 мм, размер зоны деформации в парафине  $\sim 95 \times 74$  мм.

На момент  $t_\gamma = 67,6$  мкс (опыт № 5): в слое АМГ-6 – отверстие диаметром  $\sim 86$  мм, в первом слое стали – сквозная пробоина  $\sim 55$  мм, углубление наружных оболочек в парафин  $\sim 11$  мм, зона его промятия  $\sim 90$  мм.

**Опыт № 6:**  $d_{\text{текстолит}} = 15$  мм, угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $V_0 = 5,49$  км/с,  $t_\gamma = 69,4$  мкс.

В слое АМГ-6 пробито отверстие диаметром  $\sim 80$  мм, в первом слое стали – сквозная пробоина  $\sim 42$  мм, слои наружных оболочек углубились в парафин на  $\sim 11$  мм, зона промятия оболочек  $\sim 110$  мм.

На рис. 3 приведены рабочие рентгенограммы этой серии опытов.

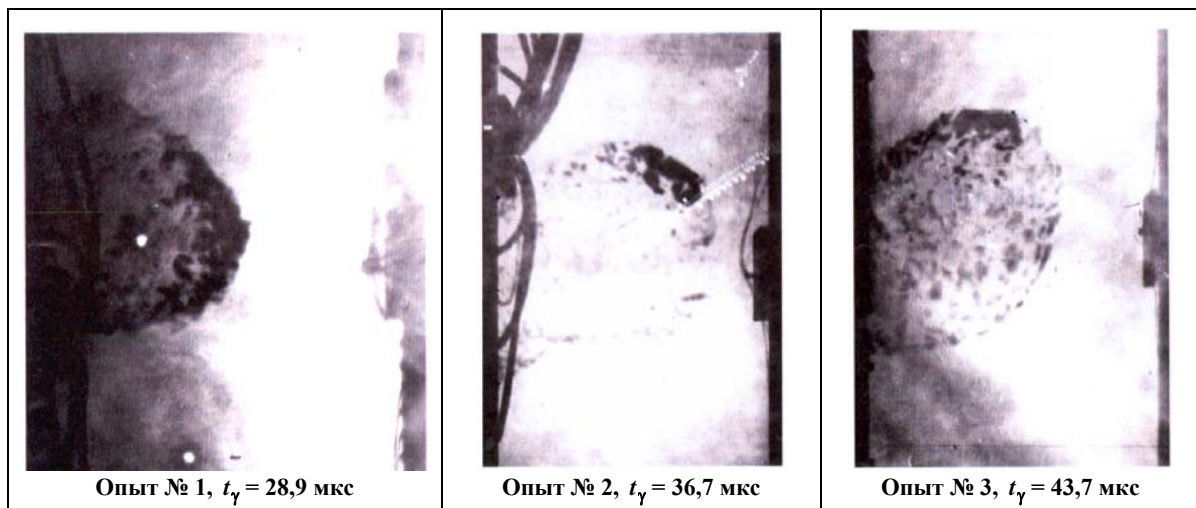


Рис. 2. Рентгенограммы опытов серии № 1 – облако запреградных осколков

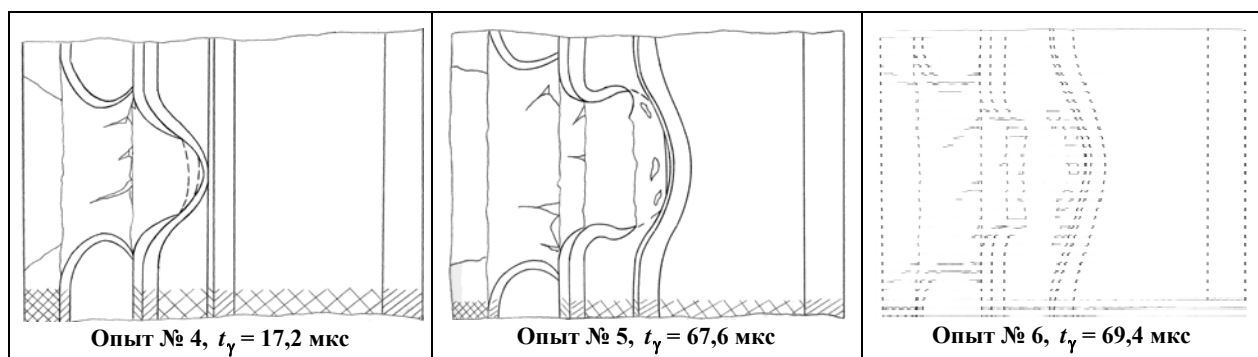


Рис. 3. Экспериментальные рентгенограммы второй серии опытов

## 2. Постановка задачи по методу КД

Любое моделирование подразумевает переход к идеализированному представлению исследуемого процесса. В методе кластерной динамики постановка задачи выглядит следующим образом.

Начальная область моделирования задается как прямоугольный параллелепипед. Внутри области размещаются модельные объекты – фигуры предметов, участвующих в процессе. Под фигурами понимаются объекты, состоящие из однородного материала, которые заполняются микрочастицами. Микрочастицы – это материальные точки, имеющие свойства выделенного объема материала: массу и энергию. Микрочастицы размещаются внутри объема фигуры по определенному закону. Рассматривается парное взаимодействие микрочастиц. В данном случае все фигуры заполняются микрочастицами, которые находятся в равновесном положении на расстоянии  $r_0 = 0,5$  мм от ближайших соседей в узлах гранцентрированной кубической решетки с периодом  $a_0 = 0,707$  мм.

В газодинамических расчетах данного класса задач для всех материалов используются УРС Ми-Грюнайзена с параметрами, представленными в табл. 1.

В программах, реализующих метод КД, предложено использовать двухчастичный потенциал, соответствующий УРС Ми-Грюнайзена. В этом УРС удельная энергия упругого сжатия холодного вещества (упругая энергия) определяется как

$$\varepsilon_x(\delta) = \frac{c_0^2}{n} \left( \frac{\delta^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $\delta = \rho/\rho_0$ , и  $c_0$ ,  $n$  – редактируемые параметры УРСа.

Зависимость энергии от расстояния между кластерами для трехмерного случая (для плотнейших (гексагональной и гранцентрированной кубической) упаковок) определяется выражением

$$\Lambda_{3D}(r) = \frac{\sqrt{2}\rho_0^3 c_0^2}{12n} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{3n-3} - 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^3 - 1 \right]. \quad (2)$$

Размерная константа для перехода от (1) к зависимости энергии от расстояния между кластерами

для данного типа упаковок есть  $\frac{\sqrt{2}\rho_0 r_0^3}{12}$ , с учетом

того, что  $\delta = \left( \frac{r_0}{r} \right)^3$ . Массы единичных кластеров для рассмотренных трехмерных упаковок определяются следующим образом:  $m_{3D} = \frac{\rho_0 r_0^3}{\sqrt{2}}$ .

Исходя из представленных выше соотношений, можно преобразовать произвольную зависимость холодной энергии от степени сжатия в зависимость энергии парного взаимодействия от расстояния между кластерами. Использование соотношения (2) УРСы веществ, заданные табл. 1, были преобразованы в потенциалы взаимодействия кластеров. При этом, для веществ использованы следующие значения радиусов обрезания ( $R_c$ ) потенциалов взаимодействия: для алюминия  $R_c = 1,015r_0$ ; для стали (ударник)  $R_c = 1,025r_0$ ; для текстолита  $R_c = 1,02r_0$ , для парафина  $R_c = 1,02r_0$ , для стали (слои в мишени)  $R_c = 1,02r_0$ . Указанные начальные параметры  $R_c$  подбирались таким образом, чтобы воспроизводилась величина удельной энергии разрушения для соответствующих материалов.

## 3. Технология проведения расчетов

Для задач пробития двухслойных преград в файле начальных данных программы МД задается три трехмерные области: куб (из которого вырезается шар) и две пластины (30×30 см). Расстояние между частицами  $r_0 = 500$  мкм, упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки  $a_0 = 707,1$  мкм). Массы частиц:  $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Тех} = 1,193 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Al} = 2,386 \cdot 10^{-7}$  кг. Задача содержит 31 028 379 кластеров (частиц).

Граничные условия по всем граням – «свободная поверхность». Начальная температура 0 К. Частицам ударника в начальный момент приписывалась скорость в направлении, определяемом углом пробития  $\alpha$ .

Таблица 1

Значения параметров для УРС Ми-Грюнайзена и УП-параметры

Вещество	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$n$	$\gamma = \Gamma + 1$	$P_{отк}$ , ГПа	$\Upsilon$ , ГПа	$\nu$
Fe (ударник)	7,8	4,9	5,0	2,6	-2,0	2,0	0,29
Текстолит	1,35	2,76	4,77	2,0	0	0,2	0,14
Al	2,7	4,9	5,0	2,1	-0,5	0,5	0,3
Сталь	7,8	5,0	5,0	2,6	-1,6	0,6	0,33
Парафин	0,9	2,96	4,77	2,0	0	0	0,5



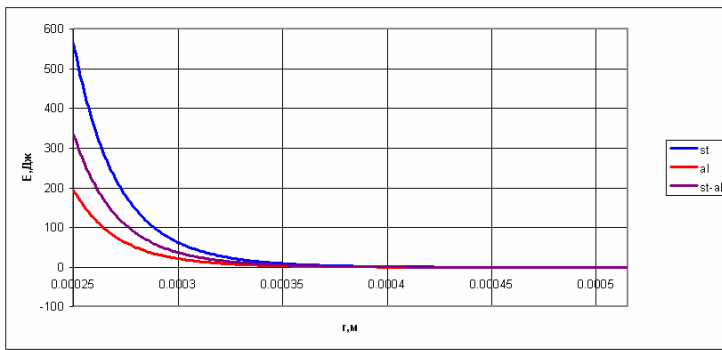


Рис. 4. Потенциалы взаимодействия частиц из различных материалов (сталь – сталь, алюминий – алюминий, алюминий – сталь)

В расчетах использовался потенциал межчастичного взаимодействия Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось либо потенциалом наиболее «мягкого» из них, либо табличными потенциалами.

Для задания потенциала взаимодействия частиц из разных материалов в табличном виде использовался алгоритм и программа, разработанные в отделе 08. Алгоритм построения таких потенциалов основывается на использовании условия равновесия сил, действующих на частицы при сжатии. Результатом работы алгоритма являются текстовые файлы, содержащие таблицы значений энергии и сил для заданного спектра значений расстояния между кластерами. Пример построения потенциалов взаимодействия частиц различных материалов показан на рис. 4.

Анализ результатов расчетов показал, что основная проблема при моделировании макроскопического поведения твердых тел методом кластерной динамики состоит в том, что регулярные упаковки частиц приводят к анизотропным моделям и свойствам материалов. Подход, позволяющий решить эту проблему, заключается в конструировании неидеальных упаковок частиц, в частности поликристаллических упаковок со случайным распределением ориентации монокристаллов. Этот метод позволяет создать изотропные модели материалов, удовлетворяющие широкому спектру механических, термодинамических и физических свойств. Поскольку метод построения поликристалла был внедрен в МД, то была проведена еще одна серия расчетов, где для ударника использовалась ГЦК упаковка частиц (постоянная решетки  $a_0 = 707,1$  мкм), а для материалов преград – поликристалл, состоящий из ГЦК зерен ( $a_0 = 707,1$  мкм). Линейный размер одного зерна был выбран  $\sim 3$  мм, и соответственно, в слое текстолита было задано 35000 зерен, а в слое алюминия 18000 зерен. Поскольку поликристалл менее плотен, чем идеальная ГЦК структура, то массы частиц для текстолита и алюминия были скорректированы:  $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Tex} = 1,2427 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Al} = 3,2782 \cdot 10^{-7}$  кг. Задача содержит 22 975 001 кластеров (частиц). Взаимодействие между частицами

разных веществ описывалось табличными потенциалами. В остальном постановка задачи такая же.

Для задач пробивания семислойных преград в файле начальных данных задается 8 трехмерных областей: куб (из которого вырезается шар) и семь пластин. Расстояние между частицами  $r_0 = 500$  мкм, упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки  $a_0 = 707,1$  мкм). Массы частиц:  $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Tex} = 1,193 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Al} = 2,386 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{сталь1} = 6,894 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{парафин} = 7,954 \cdot 10^{-8}$  кг. Задача содержит 144 176 958 кластеров (частиц).

Граничные условия по всем граням – «свободная поверхность». Начальная температура 0 К. В расчетах использовался потенциал межчастичного взаимодействия Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось потенциалом, соответствующим наиболее «мягкому» из них. Частицам ударника в начальный момент приписывалась скорость в направлении, определяемом углом пробития  $\alpha$ .

Так же, как и для задач пробития двухслойной преграды, была проведена серия расчетов с использованием поликристаллического заполнения областей частицами. А именно, для частиц ударника, парафина и третьего слоя стали упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки  $a_0 = 707,1$  мкм), для остальных слоев – поликристалл, состоящий из ГЦК зерен, линейный размер одного зерна  $\sim 3$  мм. Таким образом, число зерен составило 50000 в слое из текстолита, 12000 – в слое из алюминия и по 35000 – в первом и втором слоях стали.

Массы частиц также были скорректированы:  $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Tex} = 1,652 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{Al} = 2,95 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{сталь1} = 9,56 \cdot 10^{-7}$  кг,  $m_{парафин} = 7,954 \cdot 10^{-8}$  кг. Задача содержит 130 794 042 кластеров (частиц).

Граничные условия по всем граням – «свободная поверхность». Начальная температура 0 К. Потенциал межчастичного взаимодействия – Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось табличными потенциалами.

#### 4. Результаты расчетов пробития двухслойных преград по КД

При моделировании пробития двухслойных преграды было проведено три серии расчетов:

1. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наиболее «мягкого» из них;

2. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ;

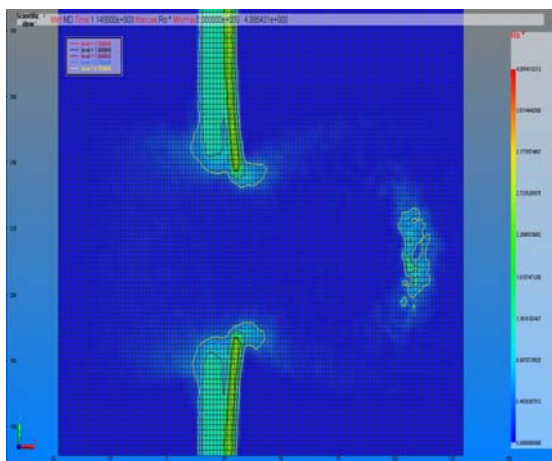
3. расчеты с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ.

Расчеты второй серии проводились на современном многопроцессорном комплексе с использованием арифметических ускорителей.

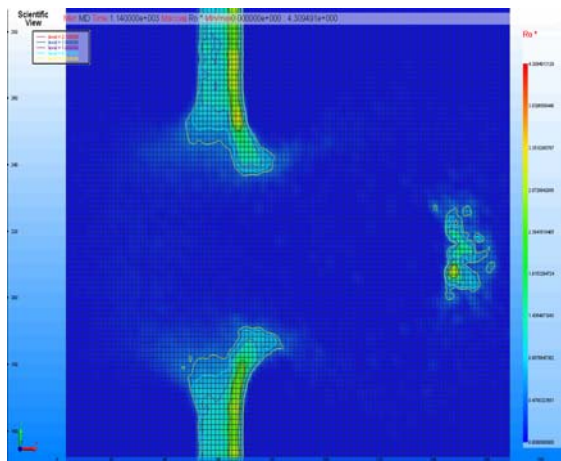
На рис. 5–7 представлена сравнительная картина поля плотностей для сечений различными плоскостями для монокристаллического и поликристаллического заполнения областей частицами для опыта № 1 на момент рентгенографирования.

Видно, что использование поликристалла позволило получить изотропную модель вещества, что привело к более качественному определению формы и размера полученных отверстий.

На рис. 8 представлены продольные сечения для опытов № 2 и 3 с использованием изотропной модели на момент рентгенографирования.

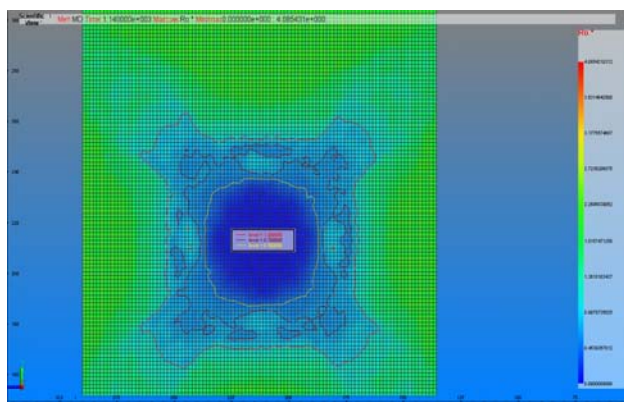


а

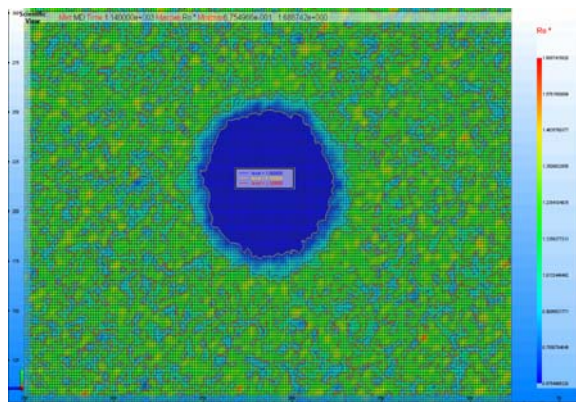


б

Рис. 5. Опыт № 1, поле плотностей в сечении плоскостью XY,  $Z = 150$  мм, с изолиниями уровня плотности,  $t = 30$  мкс: а – монокристалл, б – поликристалл

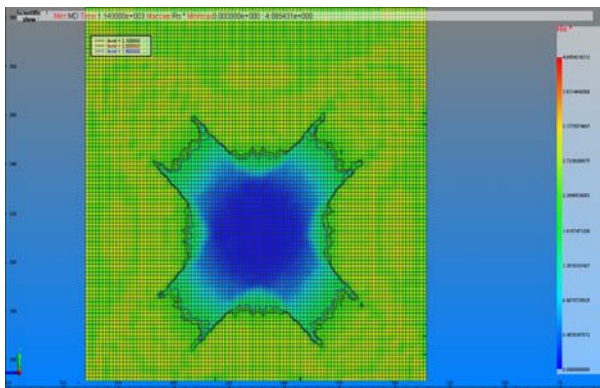


а

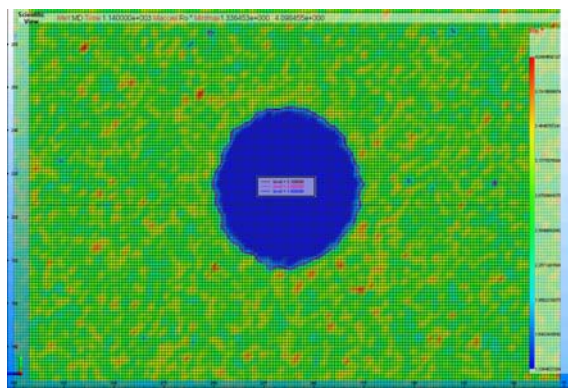


б

Рис. 6. Опыт № 1, поле плотностей в сечении плоскостью, характеризующей отверстие в текстолите с изолиниями уровня плотности на момент времени  $t = 30$  мкс: а – монокристалл, б – поликристалл

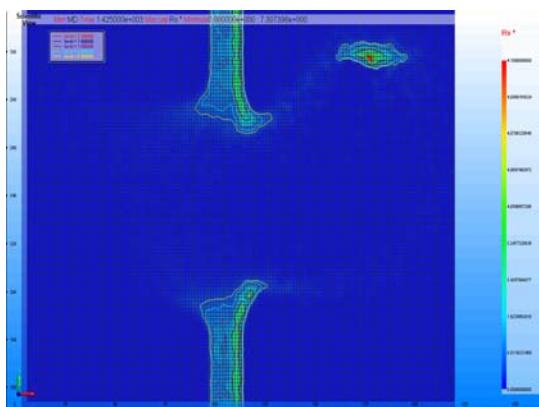


а

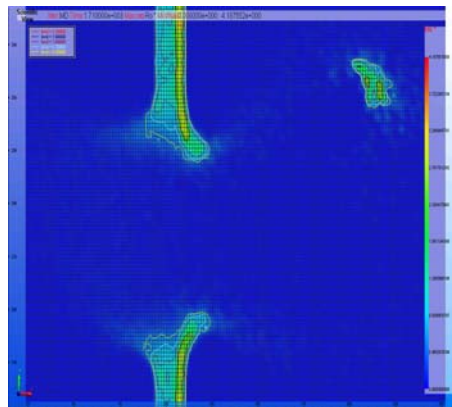


б

Рис. 7. Опыт № 1 поле плотностей в сечении плоскостью, характеризующей отверстие в АМГ-6 с изолиниями уровня плотности на момент времени  $t = 30$  мкс: а – монокристалл, б – поликристалл



а



б

Рис. 8. Поле плотностей в сечении плоскостью XY,  $Z = 150$  мм, с изолиниями уровня плотности для поликристаллического заполнения областей: а – опыт № 2 на момент времени  $t = 37,5$  мкс; б – опыт № 3 на момент времени  $t = 45$  мкс

В табл. 2–4 представлены значения размеров отверстий, полученные из расчетов по КД, там же приведены экспериментальные значения. Наибольшее отличие от эксперимента имеет размер отверстия в АМГ-6. В целом, расчетные значения отличаются от экспериментальных [4] и от данных, полученных по методикам SPH [1] и ТРЭК [2], [5], примерно на 20 %.

В табл. 2 для расчетов КД с монокристаллом опыта № 1 указаны минимальный (по вертикали) и максимальный (по диагонали) размеры отверстий.

Для опытов № 2 и № 3 соответственно в табл. 3 и 4 приведены размеры овальных отверстий в текстолите и АМГ-6, а также величина кривизны овала.

Из величин, приведенных в таблицах, и на рисунках видно, что введение модели изотропного вещества позволяет однозначно проводить измерения полученных отверстий. Их форма стала соответствовать экспериментам, а для опыта № 3 получено очень близкое количественное совпадение по сравнению с предыдущими расчетами.

Таблица 2

Результаты расчета опыта № 1 ( $t \sim 30$  мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (мм)	Диаметр отверстия в АМГ-6 (мм)	Диаметр поврежденных текстолита (мм)
Эксперимент	$\approx 70$	$\approx 100$	$\approx 140$
SPH	80	90	170
ТРЭК	62,5	53,3	107,7
КД (монокр.)	66...126	50...83	53,2...126,9
КД (монокр.+табл. пот.)	55...90	65...95	90...126
КД(поликр.+табл. пот.)	$\approx 83$	$\approx 90$	$\approx 100$



Результаты расчета опыта № 2 ( $t \sim 37$  мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (A*B, мм)	Отношение B/A	Диаметр отверстия в АМг-6 (C*D, мм)	Отношение D/C
Эксперимент	$\approx 65 * 75$	1,154	$\approx 75 * 100$	1,333
SPH	$50 * 60$	1,200	$70 * 80$	1,143
ТРЭК	$73,3 * 73,7$	1,005	$72,3 * 74,1$	1,025
КД (монокр.)	$73,6 * 82,1$	1,115	$78 * 103,3$	1,324
КД (монокр. + табл. пот.)	$60 * 80$	1,333	$70 * 100$	1,428
КД (поликр. + табл. пот.)	$90 * 92$	1,022	$94 * 101$	1,074

Таблица 4

Результаты расчета опыта № 3 ( $t \sim 45$  мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (A*B, мм)	Отношение B/A	Диаметр отверстия в АМг-6 (C*D, мм)	Отношение D/C
Эксперимент	$\approx 80 * 90$	1,125	$\approx 100 * 110$	1,100
SPH	$70 * 80$	1,143	$110 * 120$	1,091
ТРЭК	$68 * 71$	1,044	$67 * 67$	1,000
КД (монокр.)	$65,3 * 83,3$	1,276	$81 * 110$	1,358
КД (монокр. + табл. пот.)	$65 * 90$	1,384	$80 * 112$	1,4
КД (поликр. + табл. пот.)	$91 * 93$	1,022	$99 * 108$	1,091

## 5. Результаты расчетов пробития семислойных преград по КД

При моделировании опытов по пробитию семислойных преград были проведены две серии расчетов:

1. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наиболее «мягкого» из них;

2. расчеты с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала, заданного таблицей.

В табл. 5–7 представлены значения размеров отверстий, величины углублений стальных оболочек,

размеры зоны деформации в парафине, полученные из расчетов по КД опытов № 4, 5 и 6 соответственно. Там же приведены экспериментальные значения.

Из-за снижения прочностных свойств материалов во введенной модели (поликристалл) происходит увеличение размеров отверстий в АМг-6 и первом слое стали на больших временах на 10–12 % по сравнению с расчетами с монокристаллом. Отличие расчетных значений от экспериментальных, в целом, составило не более 40 %.

Размеры зоны деформации в парафине на большие времена (опыты № 5, 6) отличаются от экспериментальных значений на 30–50 %, а на время 17,2 мкс (опыт № 4) составляет менее 6 %.

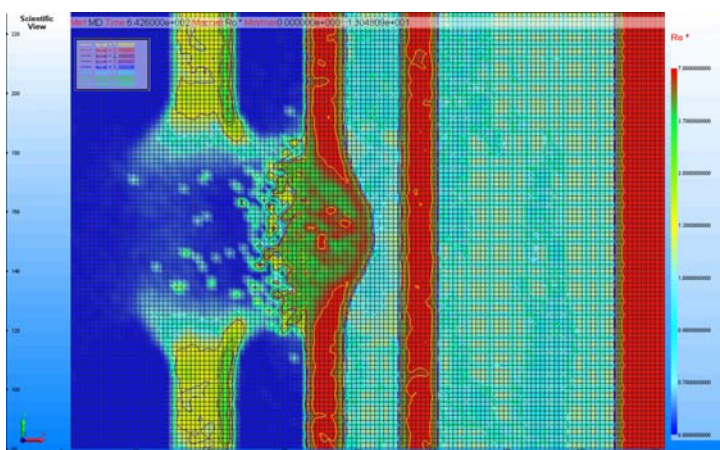


Рис. 9. Опыт № 4 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостью XY,  $Z = 150$  мм с изолиниями уровня плотности,  $t = 17,2$  мкс

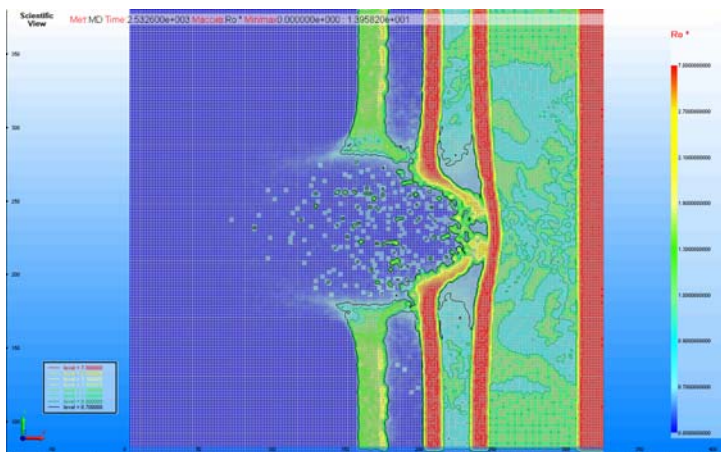


Рис. 10. Опыт № 5 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостью XY, Z = 150 мм с изолиниями уровня плотности,  $t = 67,6$  мкс

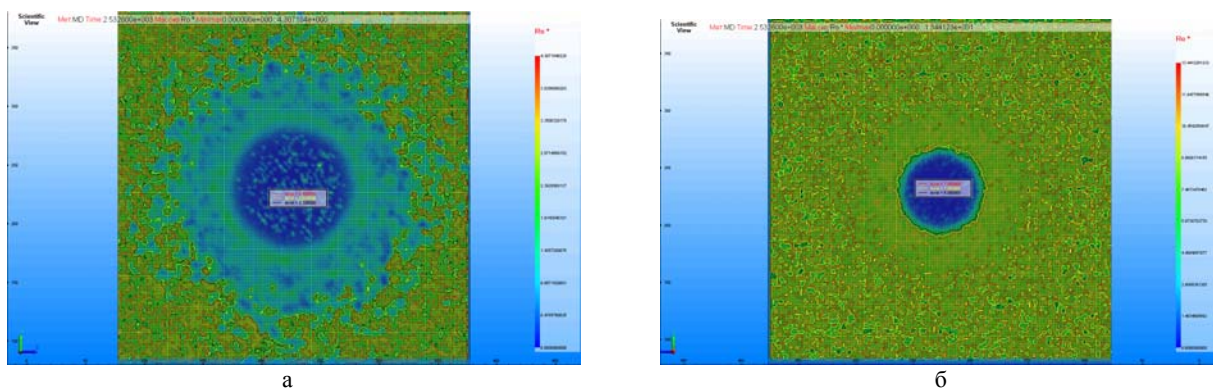


Рис. 11. Опыт № 5 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостями, характеризующими в АМГ-6 (а) и первом слое стали (б) с изолиниями уровня плотности,  $t = 67,6$  мкс

Таблица 5

Результаты расчета опыта № 4 ( $t \sim 17,2$  мкс)

	Диаметр отверстия в АМГ-6 (мм)	Углубление стали 1 в парафин (мм)	Зона деформации в парафине (мм)
Эксперимент	$\approx 57$	14	95*74
КД (монокристалл)	65	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	73	10,4	90*70

Таблица 6

Результаты расчета опыта № 5 ( $t \sim 67,6$  мкс)

	Диаметр отверстия в АМГ-6 (мм)	Диаметр отверстия в стали 1 (мм)	Углубление стали 2 в парафин 2 (мм)	Зона промятия парафина 2 (мм)
Эксперимент	$\approx 86$	$\approx 55$	11	90
КД (монокристалл)	110	40	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	121	73	10	137

Таблица 7

Результаты расчета опыта № 6 ( $t \sim 69,4$  мкс)

	Диаметр отверстия в АМГ-6 (мм)	Диаметр отверстия в стали 1 (мм)	Углубление стали 2 в парафин 2 (мм)	Зона промятия парафина 2 (мм)
Эксперимент	$\approx 80$	$\approx 42$	11	90
КД (монокристалл)	110	50	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	122	68	8	120

## Заклучение

В данной работе представлены результаты применения метода кластерной динамики для расчета трехмерного процесса пробивания плоской многослойной преграды малым поражающим сферическим элементом. Расчеты проведены с помощью разрабатываемой в математическом отделении РФЯЦ ВНИИЭФ параллельной программы «Молекулярная Динамика» (МД), в рамках которой реализован метод КД. Часть расчетов была проведена на гибридных вычислительных системах с использованием арифметических ускорителей.

В процессе исследований была использована и модель задания начальных данных в виде поликристаллического заполнения областей, которая позволяет моделировать изотропные материалы. Сравнительный анализ результатов показал, что в результате применения изотропной модели материалов получено лучшее качественное согласие с результатами экспериментов, так как исключено влияние анизотропии материала, являющейся следствием идеальной упаковки частиц. Это позволило провести однозначные измерения доступных для сравнения с экспериментальными данными параметров. Однако из-за снижения прочностных свойств материалов во введенной модели происходит больший рост отверстий по сравнению с экспериментом. Для повышения прочностных свойств материала требуется дальнейшая калибровка модели.

Расчеты показали, что метод КД, реализованный в МД, позволяет проводить моделирование опытов по пробиванию плоских преград, и дает не только качественное, но и неплохое количественное согласие с экспериментальными данными и другими расчетными методиками.

Авторы выражают благодарность Бухареву Ю. Н., Башурову В. В., Разуваеву В. А., Стадник А. Л., Янилкину Ю. В. за любезно предоставленные данные.

## Литература

1. Бухарев Ю. Н., Терешин А. И., Тверсков А. В., Башуров В. В. Численное моделирование по программе SPH процессов соударения сферических ударников с преградами со скоростями 1–6 км/с // Сб. докладов II-й научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
2. Стадник А. Л., Тарасов В. И., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика расчета трехмерных упругопластических течений многокомпонентной среды // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1995. Вып. 3. С. 52–60.
3. Давыдов И. А., Пискунов В. Н., Веселов Р. А., Воронин Б. Л., Демин Д. А., Руденко В. В., Янилкин Ю. В., Софронов В. Н. Метод кластерной динамики для моделирования динамических процессов механики сплошной среды // Доклад на конференции ММПСН-2009. М.: МИФИ. 2009.
4. Бухарев Ю. Н., Терешин А. И., Тверсков А. В., Башуров В. В. Результаты решения некоторых задач высокоскоростного (3–10 км/с) соударения твердых частиц с преградами // Сб. докладов II-й научной конференции по механике и прочности конструкций, посвященной 80-летию академика Е. А. Негина (г. Саров, 10–12 января 2001 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
5. Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1994. Вып. 4. С. 71–78.

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ЗЕРКАЛ РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ART-XC С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Л. В. Канафеева, М. В. Штыров, А. А. Тарасов, И. Д. Гончаров, А. М. Горелов, Э. Ю. Горячев,  
Е. В. Морозова, Э. А. Шаравин, В. Н. Яновский, Е. В. Санкин, В. П. Лазарчук*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В 2009 состоялось подписание соглашения между Федеральным космическим агентством (Роскосмосом) и Германским аэрокосмическим центром (DLR) о сотрудничестве по проекту орбитальной астрофизической обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» (СРГ). Ожидается, что в результате работы обсерватории будет обнаружено множество новых активных ядер галактик, а так же новых скоплений галактик, в центре которых, предположительно, находятся сверхмассивные черные дыры. РФЯЦ-ВНИИЭФ в кооперации с Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН, г. Москва) в рамках указанного проекта разрабатывает телескоп ART-XC.

Прием и фокусировку рентгеновского излучения в телескопе (диапазон энергий от 4 до 35 кэВ) должна обеспечить рентгеновская зеркальная система (РЗС), представляющая собой систему коаксиальных трубок – зеркал с нанесенным на их внутреннюю поверхность рентгеноотражающим слоем. Изготовление таких трубок – зеркал – уникальный технологический процесс, разрабатываемый во ВНИИЭФ. На заготовку из сплава АМг6 наносят толстый слой химически восстановленного никеля. После термообработки в вакууме матрица полируется, и на нее наносится методом гальванопластики слой Ni либо Ni-Co для получения оболочки зеркала [1]. Оболочка зеркала в процессе работы не должна изменять своих геометрических параметров, заданных в КД, поскольку в противном случае фокусировка рентгеновских лучей в фокальной плоскости может быть недостаточно точной, что приведет к потере информации.

## Механическая обработка матриц резанием. Финишное алмазное точение

Оболочки зеркал изготавливаются методом репликации (гальванопластики) с матриц, имеющих высокую точность геометрической формы и высокую чистоту поверхности. Цельнометаллическая заготовка матрицы изготавливается из сплава АМг6. Высокая точность геометрической формы матрицы после нанесения никелевого покрытия достигается в результате

финишного алмазного точения. Обработка поверхности прецизионной матрицы двойной конической формы диаметрами от 50 мм до 150 мм и длиной 580 мм возможна только на базе токарных обрабатывающих центров повышенной точности (см. рис. 1).

Инструментальная база для высокоточной обработки представлена мировыми лидирующими компаниями в области металлообработки, такими как Sandvik Coromant, Hoffmann Group, Korloy и т. д. [2]. Инструмент выделяется надежностью, взаимозаменяемостью, универсальностью и стойкостью, что, в свою очередь, несет помимо производительности и качество обрабатываемых изделий. Отечественный мерительный инструмент – с ценой деления 0,01 мм, высокоточный инструмент иностранного производства – с ценой деления 0,001 мм.

На этапе изготовления заготовки матрицы из сплава АМг6 под никелевое покрытие обработка ведется поликристаллическими алмазами с требуемой точностью и отклонениями формы, обеспечивая шероховатость не хуже Ra 0,1. При выполнении финишной токарной обработки натуральными алмазами (см. рис. 2) необходима предварительная настройка и разворот инструмента на углы, соизмеримые с углами матрицы для обеспечения минимально возможной шероховатости (не хуже Rz 0,032 мкм). При этом обязательны ряд условий: термостабилизация зоны обработки (или надзорный контроль за изменением температуры); подбор смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), ее напор (давление в сети) и направленность на зону обработки; базы и базирование и т. д.

Перечисленные выше условия – это только часть комплекса мероприятий технологического обеспечения качества матрицы [3]:

– Базирование и закрепление детали на станке. Отсутствие деформаций при закреплении детали. Повторяемость положения детали при закреплении.

– Начальная установка режущего инструмента в заданные координаты. Контроль сохранения координат инструмента в процессе обработки детали. Отработка управляющей программы в целом, при изготовлении тестовой детали.

– Контрольные операции. Способы обеспечения точности измерений. Особые условия проведения измерений.

– Межоперационное хранение и транспортировка деталей. Предохранение поверхностей деталей от повреждений, потемнений, загрязнений.



Рис. 1. Токарно-обрабатывающий центр повышенной точности

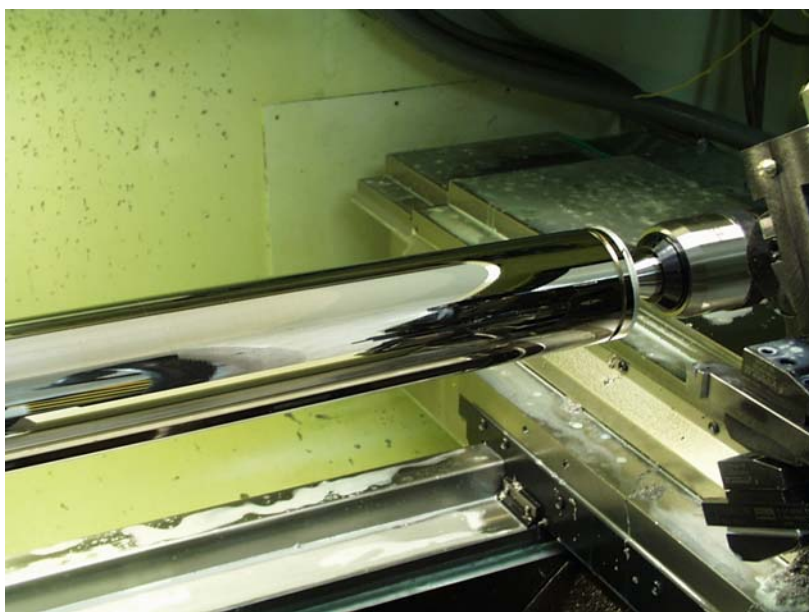


Рис. 2. Матрица после финишного алмазного точения

### Суперфинишная полировка матриц

Для обеспечения высокой чистоты внутренней поверхности реплицируемой оболочки матрица полируется. Достижение высокой степени полировки матрицы возможно только с применением специального оборудования. Такое оборудование было разработано и изготовлено в виде «Стенда полирования» (см. рис. 3). В процессе проектирования стенда были рассчитаны оптимальные режимы обработки матриц [4]: скорости рабочих ходов продольной подачи, числа оборотов образующей конической поверхности зеркала. Расчеты проведены с учетом осевых моментов сопротивления при равномерном нагружении матрицы. По результатам расчетов выбраны приводы движения, обеспечивающие требуемые

режимы работы: высокий КПД, отсутствие вибрации, люфта и холостого хода, точность хода на рабочих режимах полировки до 0,2 %. В качестве рабочего инструмента полирования разработаны притиры с оптимальным покрытием обрабатываемой поверхности и применением материалов стандартных типоразмеров (дорогостоящей алмазной шкурки) [5]. Для обеспечения высокой степени полировки впервые в России применен метод полирования абразивной шкуркой с размером зерна до 1 мкм. Новая технология является более производительной и дешевой, не требующей специальной подготовки персонала, по сравнению с технологиями использования оптической смолы с абразивными частицами, применяемыми в ГОИ Вавилова (г. Москва) и ОФЛ (г. Санкт-Петербург).





Рис. 3. Стенд полирования

Процесс полирования рабочей поверхности до максимальной чистоты производился в несколько этапов:

- полирование начиналось с применением шкурки с размером зерна 15 мкм с быстрой продольной подачей притира при медленном вращении матрицы, что позволяет убрать уступы, оставленные резцом при предварительной обработке на микроуровне, за минимально возможное время;

- дальнейшая обработка велась шкуркой с размером зерна 9 мкм и 3 мкм с обильной подачей дистиллированной воды в область полирования;

- при окончательной обработке применялась алмазная шкурка с размером зерна 1 мкм, что позволило добиться высокой степени чистоты. На сегодняшний день достигнута чистота поверхности 10 Å.

## Нанесение твердого никелевого покрытия.

### Изготовление оболочек

Постоянно совершенствуется технология получения на матрице прочносцепленного толстого покрытия никель-фосфор АМг6 с заданными свойствами [6]. Толщина и качество NI-P покрытия (нанесенного за один прием) зависит от многих параметров: подготовки поверхности покрываемого материала, состава химического никелирования, температуры и соотношения объема раствора никелирования к площади покрываемой поверхности ( $V/S$ ). Исследование влияния соотношения  $V/S$  включает по сути исследование двух важных составляющих процесса никелирования: скорости осаждения никеля, что влияет на механические свойства покрытия, и максимальной толщины покрытия в растворе без коррозийки. Зависимости для последнего соотношения при фиксированных остальных (температуре 85–87 °С) получают только эмпирически (см. рис. 4). Исследованы соотношения  $V/S$  1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:12 и результаты покрытий заготовок матриц на стенде P0714 ART-XC и модуле Э400. Практически, для исправления геометрии матриц, возникает необходимость в покрытиях более 100 мкм, поэтому при проектировании специализированного гальванического модуля Э400 объем ванны химического никелирования был выбран из соотношения  $V/S = 3,5-4$  для матрицы максимального диаметра (~150 мм). Химическое никелирование в указанной ванне матрицы минимального диаметра (~50 мм) будет идти при соотношении  $V/S = \sim 12$ , т. е. с повышенной скоростью осаждения. Для сужения диапазона изменения соотношения  $V/S$  в модуле запланировано применение емкостей – вставок для уменьшения объема раствора никелирования с уменьшением размеров матриц (см. таблицу). Сопутствующий положительный эффект: повышается степень полезной выработки раствора, уменьшаются объемы отработанного раствора, следовательно, уменьшается себестоимость изготовления матриц, что важно при масштабном изготовлении матриц и оболочек.

Наименование, размеры емкости, мм	Средние диаметры матриц, мм	Соотношение $V/S$
Ванна гальваническая, 400*400	145–100	3,4–5,4
Вставка 1, 310*330	100–83,5	3,4–4,2
Вставка 2, 290*290	83,5–72	3,4–3,9
Вставка 3, 270*270	72–62,5	3,4–4,0
Вставка 4, 250*250	62,5–48,6	3,4–4,4

Для обеспечения качественного покрытия кромок и защиты установочных поверхностей разработана КД и изготовлены комплекты технологической оснастки 28 типоразмеров матриц. Параметры оснастки подбирались экспериментально по критериям качества кромок NI-P покрытия и равномерности распределения электрического поля по цилиндрической поверхности покрываемых деталей при изготовлении оболочек. Изготовление покрытий на модуле в условиях вращения и вибрации потребовали введения специальных стяжек, предотвращающих раскручивание винтовых соединений.

Значительные масштабы изготовления штатных оболочек с высокими точностными параметрами и при стабильном качестве возможны только на специализированном гальваническом модуле с автооператором (см. рис. 5), который обеспечит:

- максимальное качество и стабильность технологических процессов (непрерывная фильтрация и перемешивание растворов и электролитов, струйная промывка деионизированной водой, вращение и «встряхивание» (вибрация) покрываемой детали и др.);
- максимальный контроль и регулирование параметров технологических процессов;
- минимизацию ручных работ.

В модуле реализуются технологии, отработанные в процессе НИР и на стенде P0714 ART-XC.

Разнотолщинность оболочек, изготовленных на стенде P0714 ART-XC, достигала 40 мкм. Этот показатель, удовлетворительный по меркам гальванических покрытий, выходит за пределы жесткого допуска, заданного в КД. Существенное повышение качества оболочек, достигнутое в модуле Э400 за счет непрерывной фильтрации электролита с перемешиванием, равномерного температурного поля ванны, непрерывного вращения матрицы, позволило снизить разнотолщинность оболочек до 25 мкм.

Параллельно с развитием технологического процесса изготовления зеркал идет конструкторская отработка составных частей телескопа, для которых используются зеркала с некоторыми допущениями. Так на этапе изготовления комплекта оболочек РЗС для ЛОИ допуск на отклонение от геометрической формы матриц был расширен до 3–5 мкм, чистота поверхности – до уровня 10 А°, оболочки без рентгеноотражающего покрытия.

По указанным выше технологиям изготовлен и передан на сборку комплект оболочек зеркал РЗС для ЛОИ (см. рис. 6).

### Наращение толщины Ni-P покрытия

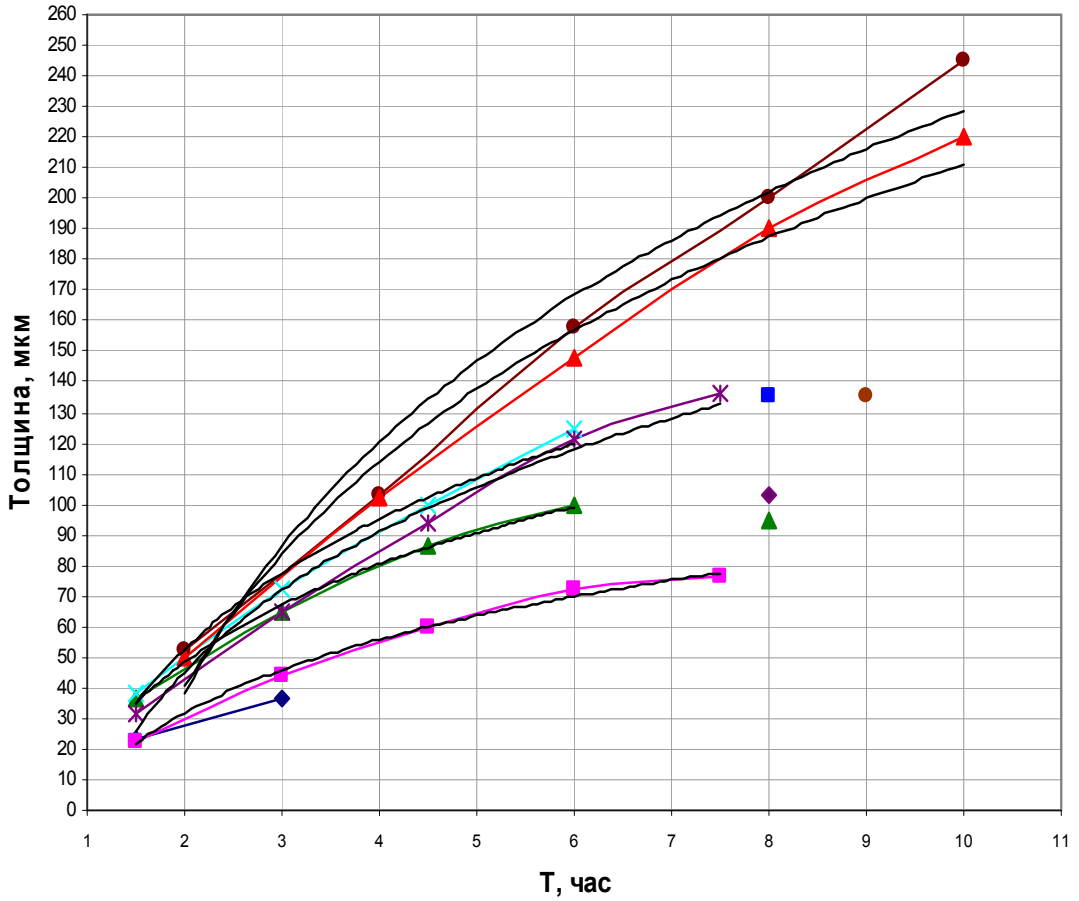


Рис. 4. Толщина никелевого покрытия в зависимости от V/S



Рис. 5. Специализированный гальванический модуль Э400



Рис. 6. Оболочки зеркал РЗС для ЛОИ

## Выводы

1. Проведены исследования процессов механической обработки и никелирования матриц. По разработанным технологиям изготовлен и передан на сборку комплект оболочек зеркал РЗС для ЛОИ с параметрами: точность геометрической формы матриц 3–5 мкм, чистота поверхности менее 10 А°, разнотолщинность оболочек менее 25 мкм с применением высокотехнологического оборудования (точение – токарно обрабатывающий центр, полирование – стенд полирования, покрытия – специализированный гальванический модуль Э400).

2. С целью достижения уникального качества штатных оболочек (точности геометрической формы матриц 0,5–1 мкм, точности углов двойной конической поверхности менее 0,12', чистоты поверхности не более 4 А° и разнотолщинности оболочек не более 20 мкм) технология их изготовления непрерывно совершенствуется:

– механическая обработка алюминиевой заготовки матрицы и ее никелированной поверхности – применением комплекса мероприятий технологического обеспечения качества изделия;

– технологии полирования – доведением режимов полирования никеля до чистоты 4 А° путем экспериментального подбора полирующих материалов;

– покрытие матрицы – стабилизацией свойств никелевого слоя, при изготовлении оболочек гальваническим методом – регулированием химического состава электролита.

## Литература

1. Садаков Г. А. Гальванопластика: Справочное пособие. М.: Машиностроение, 2004.
2. Металлорежущий инструмент [Текст]: каталог / KORLOY. С-П., 2003. 448 с.
3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст]. М.: Наука, 1983. 203 с.
4. Баранчиков В. И., Жаринов А. В., Юдина Н. Д., Садыхов А. И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. М.: Машиностроение, 1990.
5. Драгун А. П., Карпов С. Г., Сафронов И. И., Азамаскова Ж. И., Семенов А. А. Прогрессивная оснастка, приспособления и инструмент. ЛЕНИЗДАТ, 1979.
6. Горбунова К. М., Никифорова А. А. Физико-химические основы процесса химического никелирования. М.: Издательство академии наук СССР, 1960.

# ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЯ

Е. А. Осоченко, А. В. Ванин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Ограничения применения элементной базы при создании прецизионных инерциальных датчиков, разрабатываемых во ВНИИЭФ, не позволяет применять интеллектуальные и компенсационные принципы построения, что приводит к необходимости разработки датчиков прямого измерения физической величины. Среди различных типов наиболее точными являются датчики с виброчастотными первичными преобразователями (ПП), обладающие высокими метрологическими характеристиками и долговременной стабильностью выходного параметра.

В данной работе приведены результаты оптимизации метрологических параметров виброчастотного первичного преобразователя, изготовленного из пьезоэлектрического монокристаллического материала.

Рассматриваемый в рамках данной работы ПП, представляет собой объемную конструкцию [1] (см. рис. 1), состоящую из основания 1, чувствительного элемента 2, подвеса чувствительного элемента 3 с упругими шарнирами 4 в области его крепления к основанию, и силочувствительного стержневого резонатора 5 в виде сдвоенного камертона, один конец которого соединен с основанием 1, а второй с чувствительным элементом 2. Нейтральная плоскость 6 резонатора 1 и нейтральная плоскость 7 шарниров подвеса 4 разнесены в пространстве на расстояние  $h$ , тем самым образуя кинематическую схему, позволяющую получить значение растягивающей (сжимающей) силы  $N$ , действующей на резонатор в направлении его оси, превосходящую инерционную силу  $F_{и}$ , воздействующую на инерционную массу в отношении расстояния  $l_{ц.м.}$  от оси поворота подвеса 3 до центра масс конструкции к расстоянию  $h$ .

Как известно [2], колебания изгиба призматического стержня при действии растягивающей (сжимающей) силы в направлении его длины определяется следующим дифференциальным уравнением:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \mp N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $J$  – момент инерции стержня в направлении колебаний;  $N$  – осевая сила;  $\rho$  – плотность материала;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня.

Решение уравнения (1) найдем в форме  $y = X(A \cos pt + B \sin pt)$  с учетом граничных условий в виде  $X_i = \sin\left(\frac{i\pi x}{l}\right)$ . Частота колебаний призматического стержня с жестко заземленными концами при действии силы в направлении его длины определяется из выражения вида:

$$f = f_0 \sqrt{1 + NB - \gamma(NB)^2}, \quad (2)$$

где  $B$  – величина, обратная критической силе стержня резонатора;  $f_0$  – частота колебаний не нагруженного стержня резонатора.

$$f_0 = 1,0279 \cdot \frac{w}{L_p^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $w$ ,  $L_p = l$  – ширина и длина стержня, соответственно.

$$B = 0,02533 \frac{l^2}{EJ_{\min}}, \quad (4)$$

где  $J_{\min}$  – минимальный момент инерции стержня.

Разложим выражение (2) в ряд и представим в виде приращения частоты:

$$\Delta f = f_0 \left[ \pm \frac{1}{2} NB - \frac{1}{8} (NB)^2 \pm \frac{1}{16} (NB)^3 \right], \quad (5)$$

где  $\Delta f$  – девиация частоты.

Как уже было отмечено, коэффициент преобразования инерционной силы  $F_{и}$  в силу растяжения (сжатия) резонатора  $N$  в первом приближении (предполагая отсутствие влияния упругого шарнира) определяется выражением:

$$N = F_{и} \frac{l_{ц.м.}}{h_0} = ma \frac{l_{ц.м.}}{h_0}, \quad (6)$$

где  $m$  – масса чувствительного элемента;  $a$  – величина измеряемого ускорения.

С учетом (4) и (6) выражение (5) примет следующий вид:

$$\Delta f = f_0 \left[ \pm \frac{1}{2} k_1 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right) - k_2 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right)^2 \pm \frac{1}{2} k_3 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right)^3 \right], \quad (7)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – постоянные коэффициенты.

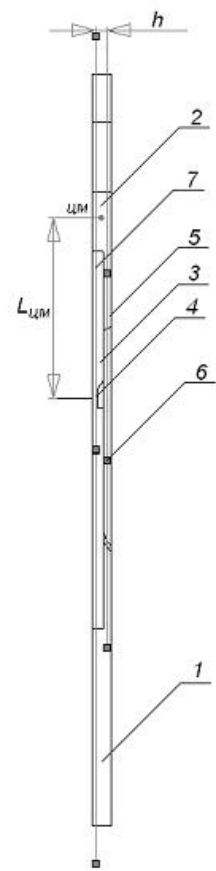
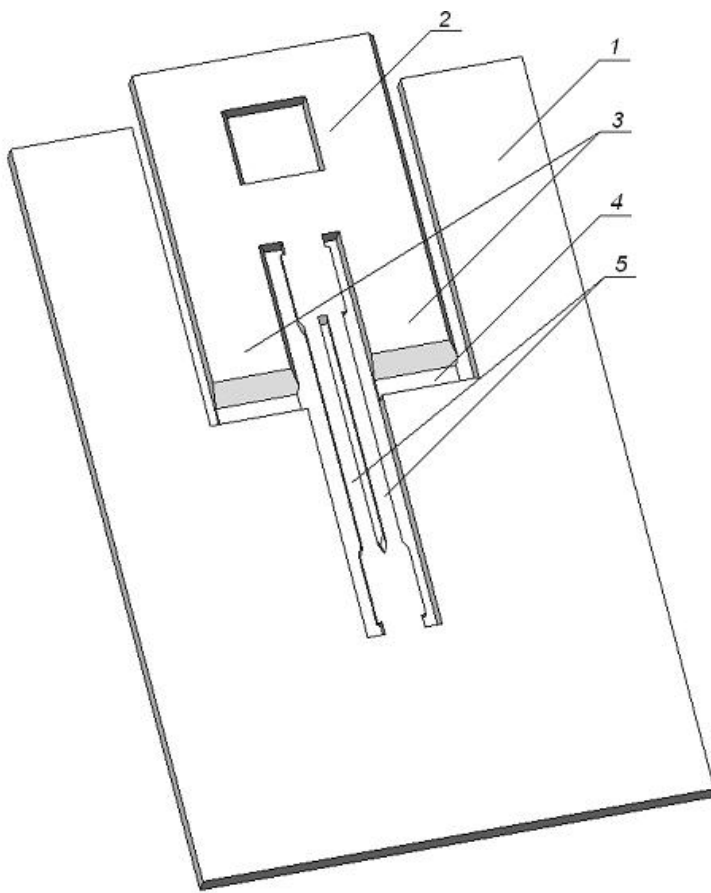


Рис. 1

При дифференциальном принципе построения прибора в предположении об идентичности ПП получим:

$$f_{\Sigma} = f_p + f_p \left[ k_1 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right) + \frac{1}{2} k_3 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right)^3 \right], \quad (8)$$

где  $f_p$  – начальная разность частот ПП в дифференциальной паре.

Вибрационная составляющая погрешности может быть определена при подстановке в выражение (8) значения ускорения, определяемого постоянной и переменной составляющей  $a = a_n + a_b \sin \omega t$ .

Выражение (8) примет вид:

$$f_{\Sigma б} = f_{\Sigma} + f_p \left[ k_1 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \sin \omega t \right) + \frac{1}{2} k_3 a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \sin \omega t \right)^3 \right]. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), за время измерения, кратное периоду колебаний, погрешность от действия

синусоидальной вибрации обратится в ноль. Однако следует заметить, что при более детальном рассмотрении функции преобразования, с учетом не идентичности ПП, в выражении (9) появляется постоянная величина, обусловленная нелинейностью характеристики преобразования, приводящая к детектированию вибрации. Минимум этой составляющей погрешности будет достигнут при минимальной разнице приведенных значений разницы начальных частот ПП и их коэффициентов преобразования.

Температурная составляющая погрешности носит как аддитивный, так и мультипликативный характер, зависящий от изменения линейных размеров конструкции и физико-механических свойств материала (модуля упругости, плотности).

Аддитивная ее часть обусловлена изменением начальной разности частоты.

$$\delta f_{pA} = f_p \frac{1}{\left(1 + b_l(T - T_0) + c_l(T - T_0)^2\right)} \times \frac{\left(1 + b_E(T - T_0) + c_E(T - T_0)^2\right)}{\sqrt{\left(1 + b_p(T - T_0) + c_p(T - T_0)^2\right)}}, \quad (10)$$

где  $b_l$ ,  $b_E$ ,  $b_p$  – температурные коэффициенты первого порядка линейного расширения, модуля упру-



гости и плотности, соответственно;  $c_l$ ,  $c_E$ ,  $c_p$  – температурные коэффициенты второго порядка линейного расширения, модуля упругости и плотности, соответственно;  $T$ ,  $T_0$  – начальная и расчетная температура, соответственно.

Выражение (10) достигает минимума при

$$\begin{aligned} & \left(1 + b_l(T - T_0) + c_l(T - T_0)^2\right)^2 = \\ & = \frac{\left(1 + b_E(T - T_0) + c_E(T - T_0)^2\right)^2}{\left(1 + b_p(T - T_0) + c_p(T - T_0)^2\right)^2} \end{aligned}$$

или

$$\xi_l^2 = \frac{\xi_E}{\xi_p} \quad (11)$$

что является первым условием определения температурно-независимого среза монокристалла.

Мультипликативная часть обусловлена температурной зависимостью величины в круглых скобках выражения (8):

$$\delta f_{pM} = f_p a \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right) [a_1 + a_2], \quad (12)$$

где

$$a_1 = k_1 \left( \frac{\xi_p}{\xi_E} \xi_l - \frac{1}{\xi_l} \sqrt{\frac{\xi_E}{\xi_p}} - \sqrt{\frac{\xi_p}{\xi_E}} \right),$$

$$a_2 = k_3 a^2 \left( m \frac{l_{ц.м.}}{h_0} \frac{l^2}{EJ_{\min}} \right)^2 \frac{\xi_p}{\xi_E} \xi_l \left( 3 + 3 \frac{\xi_p}{\xi_E} \xi_l + \left( \frac{\xi_p}{\xi_E} \xi_l \right)^2 \right).$$

Выражение (12) достигает минимума при

$$[a_1 + a_2] = 0. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (11) и (13) относительно  $\xi_l$  определим условия для определения температурно-независимый среза монокристалла.

Рассмотрим величину, характеризующую эффективность преобразования силы в изменение частоты, – отношение относительной девиации частоты к относительной деформации стержней резонатора. Назовем эту величину коэффициентом эффективности преобразования. С точностью до 1 % его величина определяется выражением следующего вида:

$$K_{эф} = \frac{\varepsilon f}{\varepsilon} = \frac{1}{2} BES = 0,012 \frac{Sl^2}{J_{\min}}. \quad (14)$$

Предположим, что толщина стержня больше его ширины, тогда выражение (14) можно переписать в виде:

$$K_{эф} = 0,0144 \frac{l^2}{w^2}. \quad (15)$$

Таким образом, эффективность преобразования растет с увеличением длины стержней резонатора и уменьшением ширины его ветвей.

Обеспечение заданного значения мультипликативной погрешности в условиях жестких требований по аддитивной составляющей погрешности от изменения температуры и действия широкополосной случайной вибрации невозможно без выбора размеров ПП оптимальных с точки зрения технологических возможностей изготовления и обеспечения условия отсутствия паразитных частот в диапазоне изменения основной (рабочей) частоты.

Решением задачи оптимизации является нахождение минимума целевой функции вида

$$F(b, h_p, l, w, f, m, l_{ц.м.}, h_0, J_{\min}, T) \rightarrow \min \quad (16)$$

при наложении ограничений, связанных с топологическими нормами изготовления, заданными габаритными размерами и условиями воздействия внешних факторов.

При помощи конечно-элементного метода производится расчет собственных форм колебаний конструкции в диапазоне частот от нуля до значения, превышающего тройное значение рабочей частоты ПП на 5÷10 %.

Каждая мода кодируется в соответствии с направлением колебаний и номером формы. Расчет производится с учетом топологических норм для максимально и минимально податливого ПП в условиях действия измеряемого ускорения и повышенных (пониженных) температур. Критерием оптимизации является получение ПП с максимальным коэффициентом эффективности и полосой частот ниже и выше частоты рабочего резонанса свободной от паразитных (близлежащих) форм колебаний. Величина полосы частот определяется исходя из максимальной девиации рабочей частоты в условиях действия измеряемой величины, вкладом погрешностей от действия дестабилизирующих факторов, с учетом коэффициента запаса не менее 1,1. По результатам расчетов строится модальная картина – зависимость частоты колебаний от изменения рассматриваемого параметра.

На рис. 2, 3 представлены примеры правильного и неправильного построения модальной картины в зависимости от взаимного расположения форм колебаний при изменении толщины резонатора. Из графика рис. 2 не видно взаимного влияния форм колебаний. Из графика рис. 3 явно видно, что наиболее предпочтительной является толщина 90 мкм, а при толщине 108 мкм возможно взаимное влияние форм колебаний рабочей частоты (1рXY (res)) и «паразитной» формы (1sM+2sYZ).

На рис. 4 представлен график суммарной модальной картины для резонатора при изменении массы, присоединенной к стержням резонатора, для трех различных толщин резонатора.



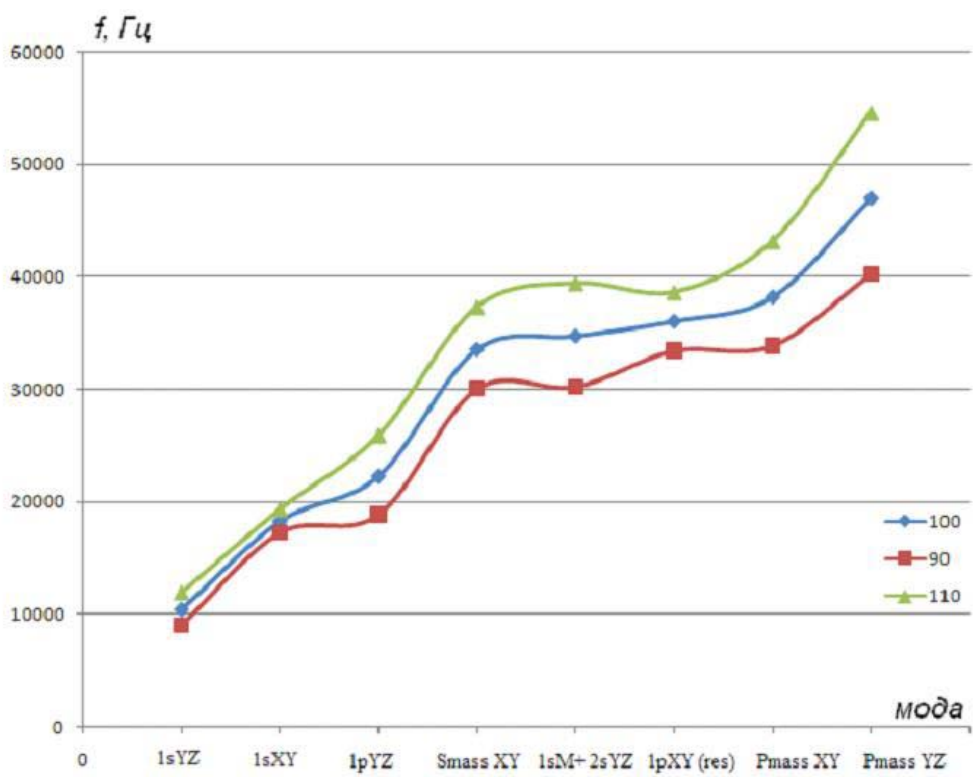


Рис. 2

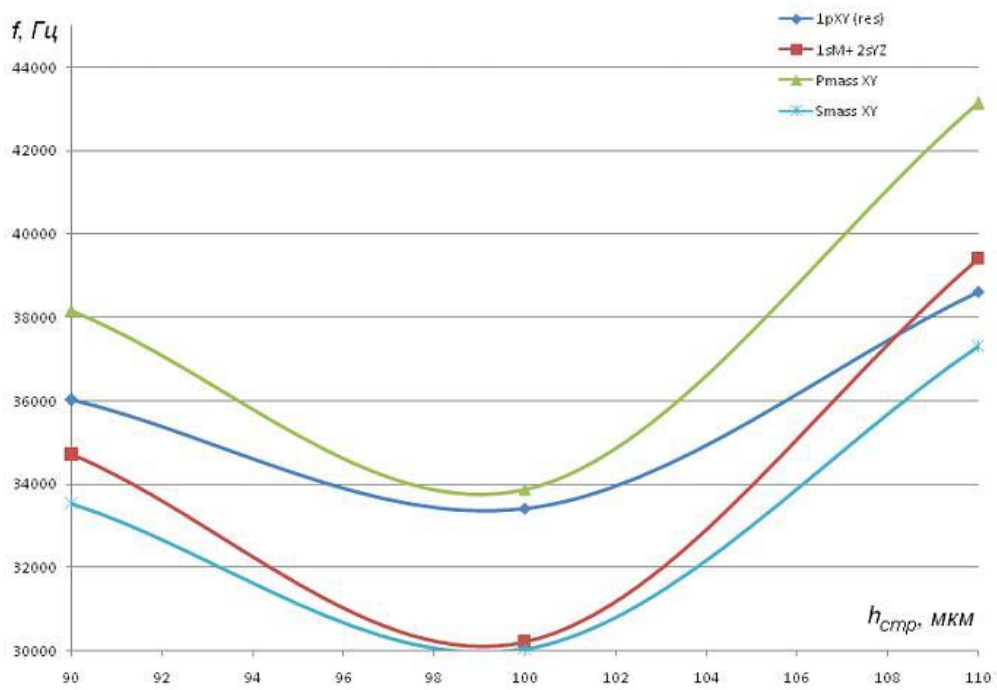


Рис. 3

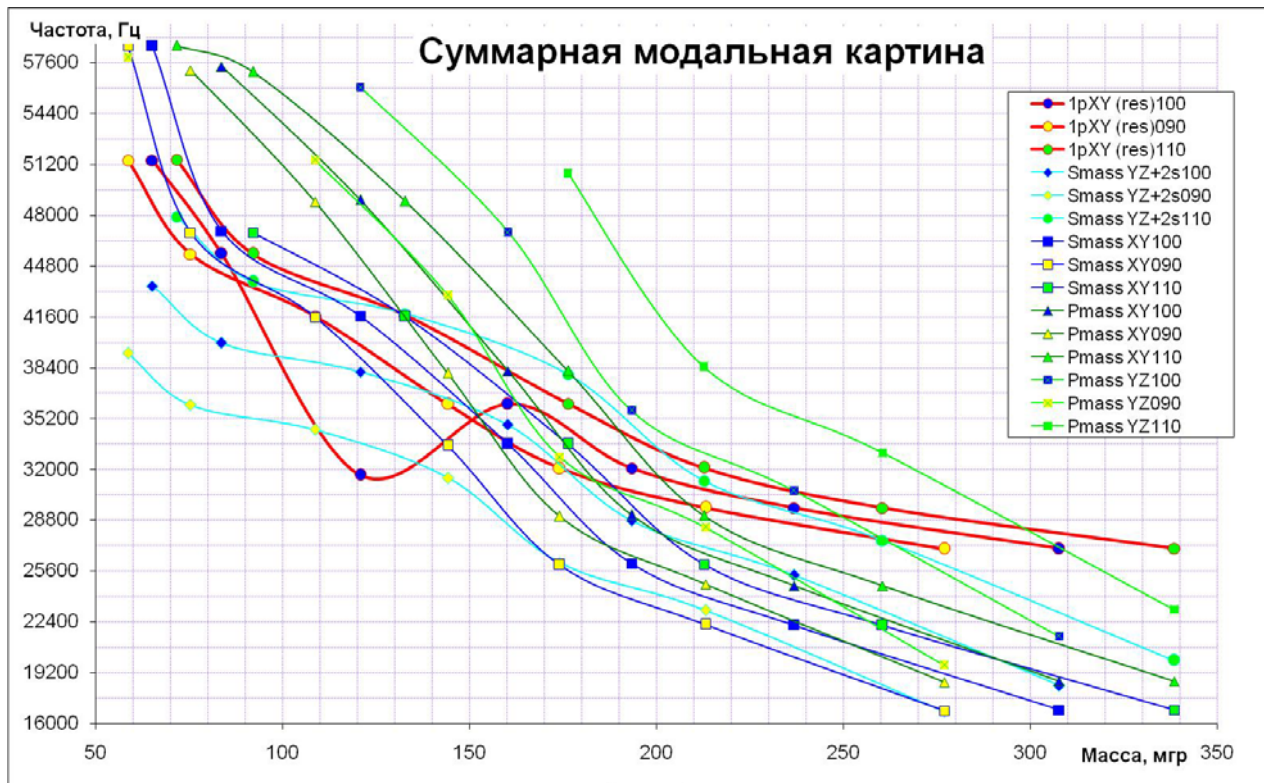


Рис. 4

При величине присоединенной массы 120 мг, прослеживается завязка основного резонанса (мода 1pXY (res)) с модами колебаний Smass YZ+2s, Smass XY. Данный график является показательным. Подобные завязки резонансов различных форм колебаний могут происходить на частотах, соответствующих точкам пересечения кривых, соответствующих тем или иным формам колебаний.

Представленная методика позволяет смоделировать оптимальные параметры конфигурации любой колебательной системы с целью получения полосы частот ниже и выше частоты рабочего резонанса свободной от паразитных (близлежащих) форм колебаний.

## Литература

1. Патент RU 2217767 опубликован в БИ 27.11.2003.
2. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985.
3. Ицкович Г. М. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1986.
4. Ананьев И. В., Тимофеев П. Г. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование. М.: Машиностроение, 1965.

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ РЕАКЦИИ ВО ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. А. Старостина, П. А. Амеличев, В. Н. Герман, С. Э. Гребенникова, С. А. Вахмистров

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Цель настоящей научно-исследовательской работы состояла в проведении расчетно-экспериментальных исследований кинетических характеристик взрывчатых веществ (ВВ) при повышенных температурах для обеспечения корректного численного моделирования возникновения теплового взрыва ВВ.

Во ВНИИЭФ в последние годы уделяется внимание расчетно-теоретическим работам по созданию точных моделей прогнозирования реакции взрывчатых веществ на различного рода тепловые воздействия (например, модели теплового взрыва). При построении расчетных моделей теплового взрыва необходимо знать кинетические параметры термораспада ВВ, которые определяют по данным экспериментальных исследований.

На сегодняшний день к наиболее распространенным методам исследования кинетики термораспада ВВ относятся: манометрический метод, методы термического анализа (дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрия). В данной работе был применен метод ДСК, который позволяет с высокой точностью исследовать процесс термораспада ВВ с учетом многостадийности реакции.

Одной из наиболее важных стадий в исследовании химических реакций термического разложения ВВ является создание кинетической модели реакции термораспада на основании экспериментальных данных. Созданная кинетическая модель может быть использована для решения различного рода задач, например, для анализа термической стабильности, определения критических условий возникновения теплового взрыва. Однако, практическое применение таких моделей возможно только после их верификации на основании маломасштабных модельных экспериментов по тепловому взрыву с точно контролируемыми граничными условиями.

В данной работе на примере пластифицированного тэна показано применение подхода к оценке уровня безопасного обращения с ВВ при воздействии на них тепловых потоков, который включает в себя:

- экспериментальное исследование кинетики термического разложения ВВ;
- построение кинетической модели (КМ) термического разложения ВВ на основании полученных

экспериментальных данных с учетом многостадийности процесса;

- использование КМ термического разложения ВВ в математической модели теплового взрыва.

Представленный подход, основанный на экспериментальных данных, полученных методом ДСК, по мнению авторов, в дальнейшем позволит рассчитывать не только тепловой взрыв, но и поведение ВВ при различных тепловых воздействиях в составе изделий различной геометрии.

Работы проводились с использованием программного обеспечения (ПО) «Thermal Safety Software» (TSS), разработанного РНЦ «Прикладная химия» совместно с ЗАО «Химинформ» (г. Санкт-Петербург) и предназначенного для оценки реакционной опасности химических процессов на химических предприятиях и производствах.

## 1. Экспериментальное исследование кинетики термического разложения ВВ

Объектом исследования являлся пластифицированный тэн.

Исследование термического разложения ВВ проводили с использованием дифференциального микрокалориметра DSC 111 фирмы Setaram (Франция). Суть микрокалориметрического эксперимента состояла в нагреве ВВ в герметично замкнутом объеме при скоростях нагрева 0,025 °С/мин, 0,5 °С/мин, 3 °С/мин, 10 °С/мин в диапазоне температур 20–500 °С. Управление экспериментом, сбор и первичную обработку данных осуществляли с помощью компьютера, входящего в состав калориметрического комплекса. На рис. 1 представлены исходные кинетические ДСК кривые термического разложения пластифицированного тэна.

Обработка данных кинетического эксперимента (ДСК данных), включала в себя коррекцию ДСК кривых на положение экспериментальной базовой линии, реконструкцию температуры, деконволюцию, фильтрацию и прореживание данных, расчет дополнительных откликов  $Q(t)$  [1, 2].

Обработанные экспериментальные данные далее использовали для построения КМ термического разложения пластифицированного тэна.

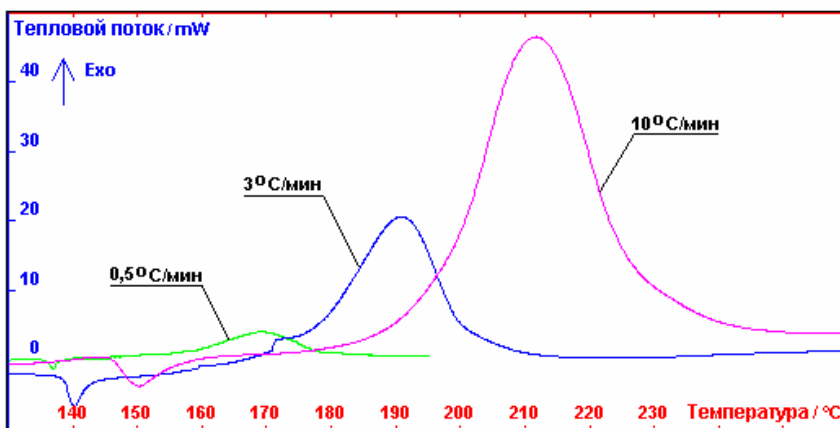


Рис. 1. Исходные ДСК кривые термического разложения пластифицированного тэна

## 2. Построение кинетической модели термического разложения ВВ на основании экспериментальных кинетических данных ДСК анализа

Проанализировав существующие на сегодняшний день представления о кинетике и химизме термического разложения тэна [3, 4], процесс термического разложения пластифицированного тэна описали стадиями, представленными на рис. 2.

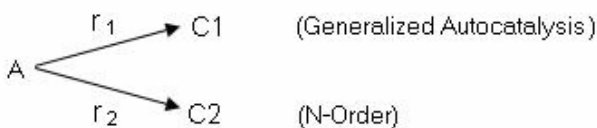


Рис. 2. Схема кинетической модели процесса термического разложения пластифицированного тэна

Реакции, входящие в модель, описываются уравнениями:

$$r_1 = k_{01} \exp(-E_1/RT)(1-\alpha)^{n_{11}}(z + \alpha^{n_{12}}); \quad (1)$$

$$r_2 = k_{02} \exp(-E_2/RT)(1-\alpha)^{n_{21}}, \quad (2)$$

где (1) – реакция обобщенного автокатализа (Generalized Autocatalysis); (2) – реакция  $n$ -го порядка (N-Order);  $r_i$  – скорость  $i$ -й реакции;  $z$  – автокаталитическая константа;  $k_{0i}$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_i$  – энергия активации  $i$ -й реакции;  $n_{ij}$  – порядки реакций;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Построение кинетической модели заключалось в определении параметров, с помощью ПО TSS, которые наилучшим образом описывают экспериментальные данные.

В табл. 1 представлены расчетные значения параметров КМ термораспада пластифицированного тэна.

На рис. 3, 4 в графическом виде представлены результаты описания параметрических откликов термического разложения пластифицированного тэна построенной КМ.

Таблица 1

Расчетные значения кинетических параметров для каждой стадии термического разложения пластифицированного тэна

Стадия	Обозначения параметров	Размерность	Значения параметров
A → C1 Реакция обобщенного автокатализа	$\ln(k_{01})$	$\ln(1/c)$	30,004
	$E_1$	кДж/моль	132,008
	$n_{11}$	–	1,4502
	$n_{12}$	–	0,7795
	$z$	–	7,329E-04
	$Q_1$	кДж/кг	5493,8328
A → C2 Реакция $n$ -го порядка	$\ln(k_{02})$	$\ln(1/c)$	30,073
	$E_2$	кДж/моль	140,2841
	$n_{21}$	–	0,7768
	$Q_2$	кДж/кг	563,7812

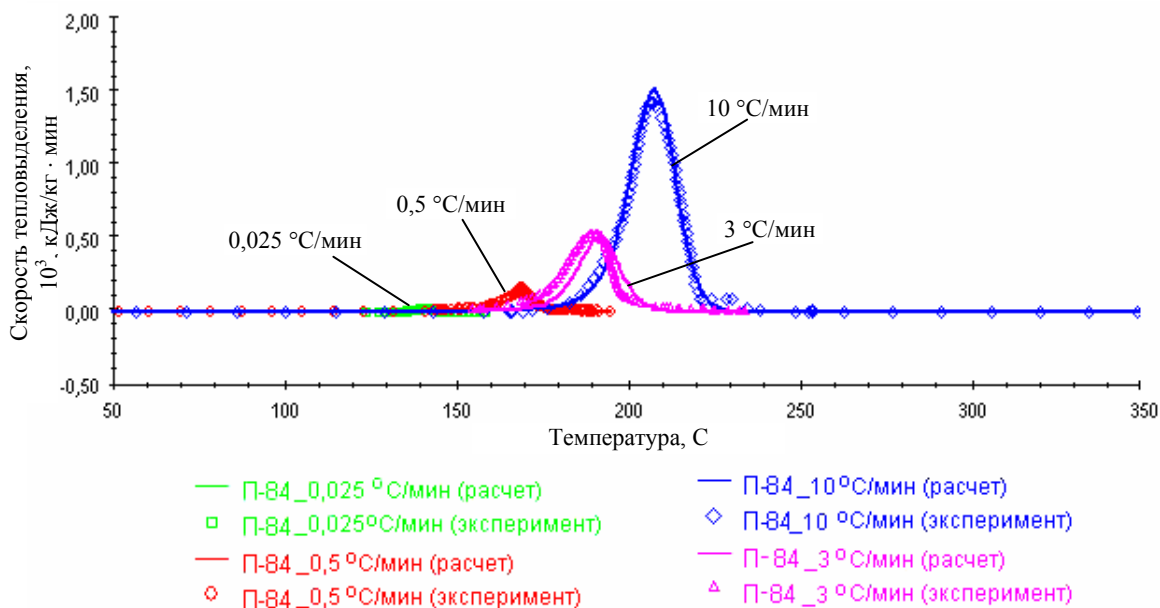


Рис. 3. Описание дифференциальных откликов термического разложения пластифицированного тэна построенной кинетической моделью

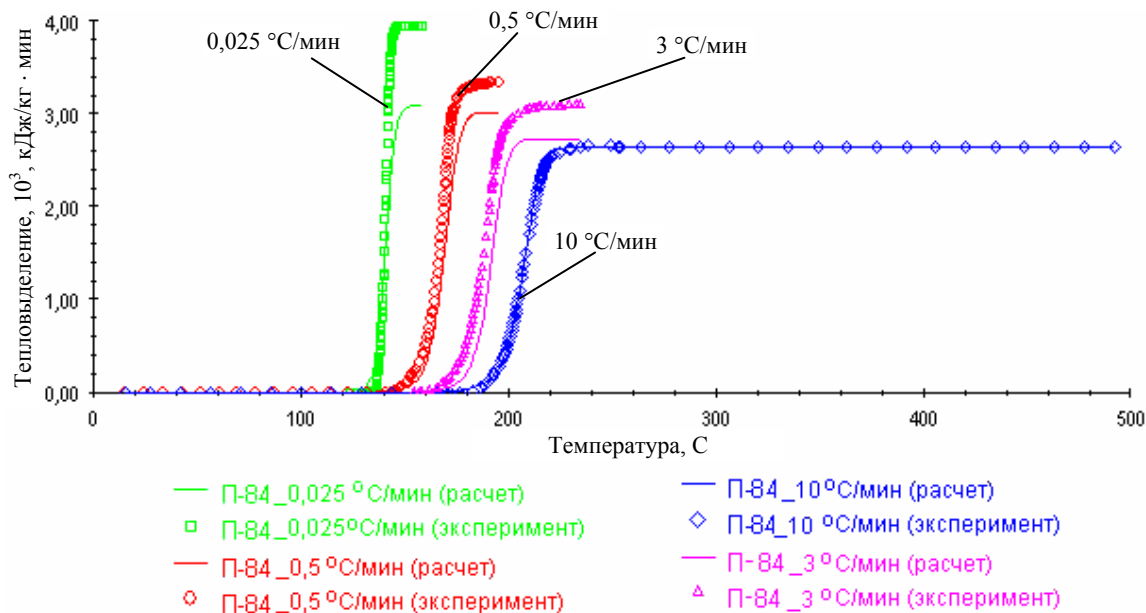


Рис. 4. Описание интегральных откликов термического разложения пластифицированного тэна построенной кинетической моделью

Построенная КМ термического разложения пластифицированного тэна показала хорошее описание экспериментальных ДСК кривых.

### 3. Моделирование теплового взрыва с использованием кинетической модели термического разложения пластифицированного тэна

Построенная КМ термического разложения ВВ была использована для прогнозирования реакционной способности пластифицированного тэна в виде

цилиндрического образца  $\varnothing 15 \times 15$  мм. Использован метод математического моделирования теплового взрыва в ВВ [2], [5], в основу которого заложены теории Франк-Каменецкого, Семенова и др. [6], [7]. Они дают удобные аналитические выражения для расчетов критических параметров, когда начало самоподдерживающейся реакции (в частности – термический взрыв) развивается в твердом теле (теория Франк-Каменецкого) и жидкостях (теория Семенова для хорошо перемешанных систем).

В расчеты вводили следующие параметры:

1. Теплофизические константы пластифицированного тэна:

$c_p = 1335 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$  при  $T = 30 \text{ °C}$ ;

$\lambda = 0,47 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$  при  $T = 25 \text{ °C}$ .

2. Теплофизические константы алюминия, из которого был изготовлен блюмс

$c_p = 896 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$ ;  $\lambda = 209 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$  [8].

3. Геометрические размеры образца ВВ  $\text{Ø}15 \times 15 \text{ мм}$ .

4. Геометрические размеры блюмса  $\text{Ø}125 \times 125 \text{ мм}$ .

5. Плотность ВВ  $\rho = 1,535 \text{ г/см}^3$ .

6. Плотность алюминия  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ .

7. Граничные условия (ГУ) первого рода на поверхности блюмса  $T_e(t)$ , полученные из проведенных ранее модельных экспериментов.

На рис. 7–9 в графическом виде представлены результаты моделирования.

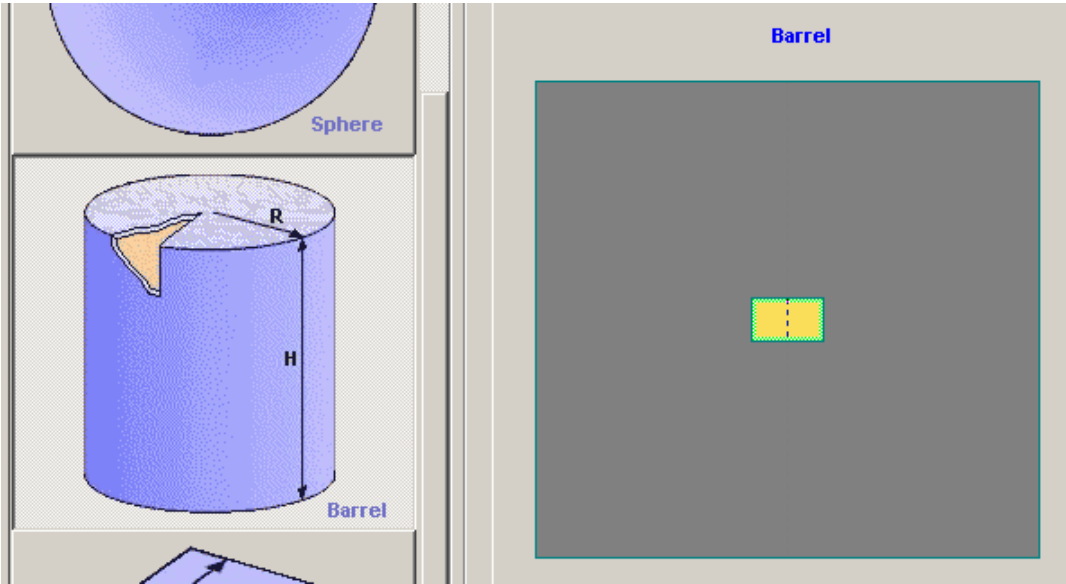


Рис. 5. Пользовательский интерфейс ThermEx: задание геометрии объекта

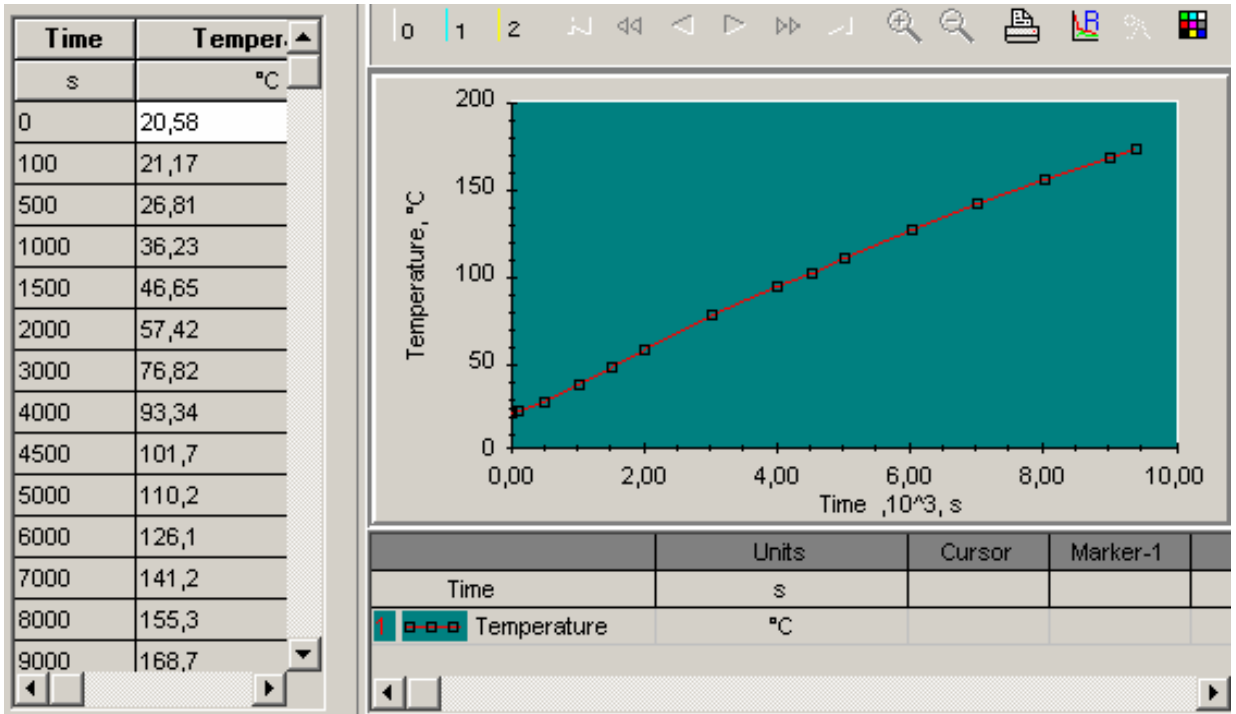


Рис. 6. Пользовательский интерфейс ThermEx: задание граничных условий на поверхности блюмса



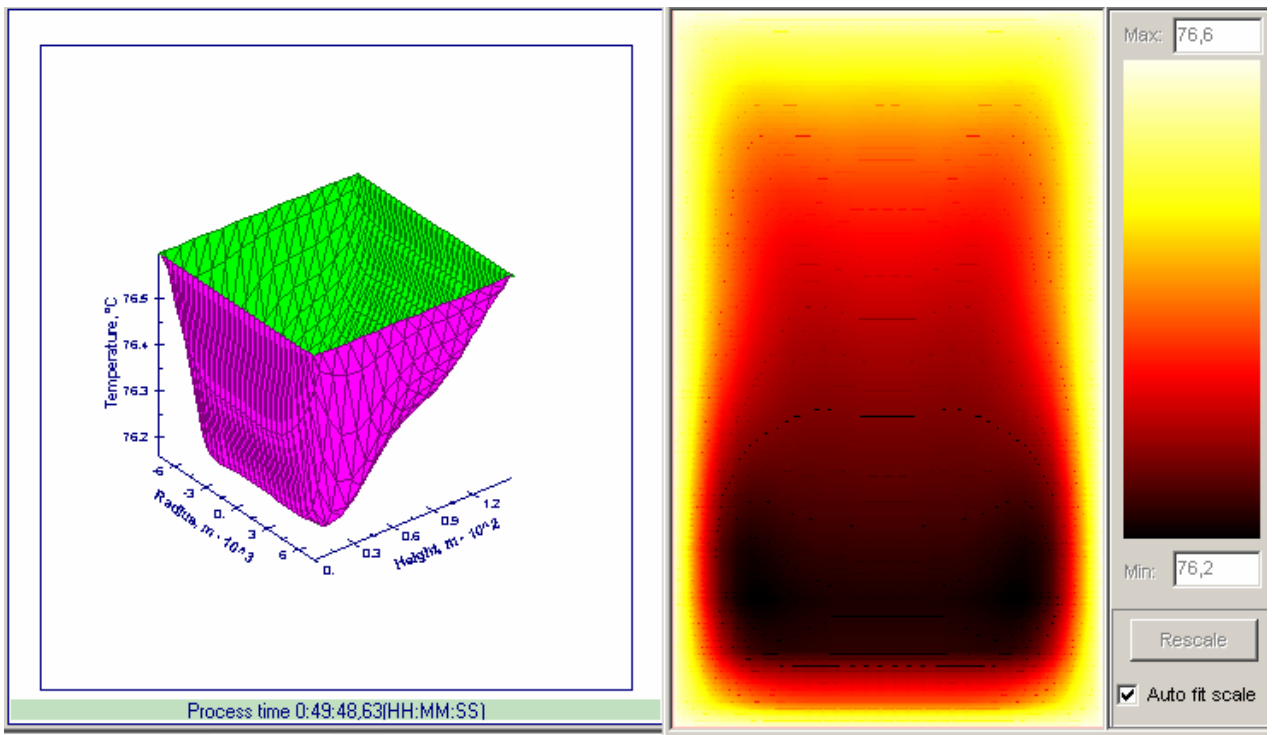


Рис. 7. Распределение температуры в образце из пластифицированного тэна в условиях неизотермического нагрева (2988 с)

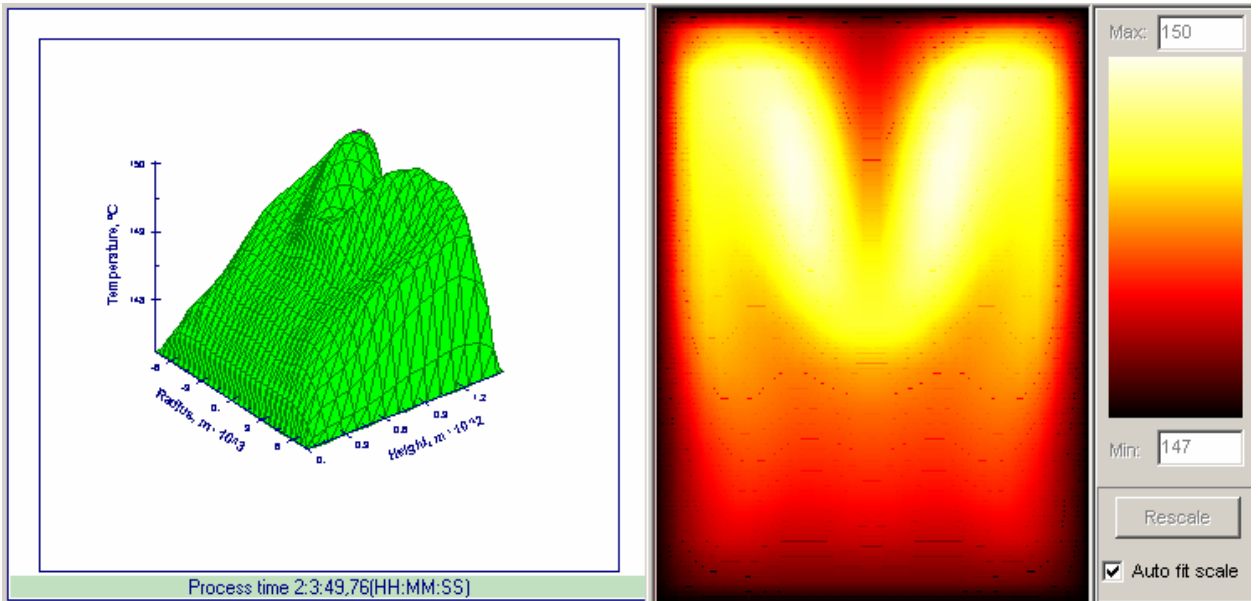
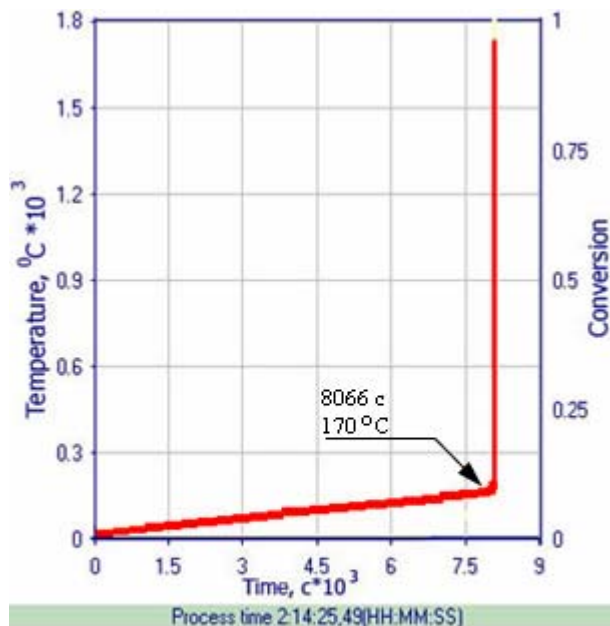
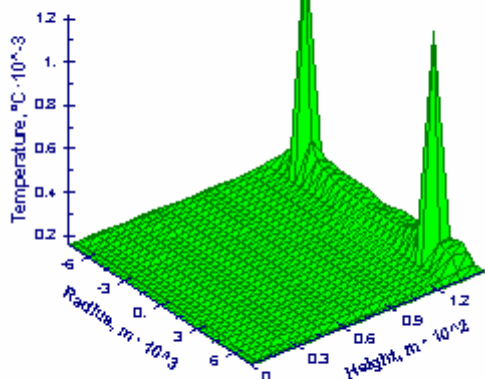


Рис. 8. Распределение температуры в образце из пластифицированного тэна в условиях неизотермического нагрева (7429 с)



— Температура в центре образца из пластифицированного тэна

Рис. 9. Изменение температуры в образце из пластифицированного тэна Ø15x15 мм

По результатам расчетов, через 2 ч 14 мин 25,49 с от начала нагрева в детали происходит резкий подъем температуры, что свидетельствует о начале самоподдерживающейся реакции в ВВ.

В условиях проведения испытания по нагреву детали Ø15x15 мм из пластифицированного тэна было зафиксировано НСПР ВВ. Время до НСПР составило 2 ч 29 мин 23 с. Экспериментальное время до НСПР превысило расчетное на 10 %.

Представленный подход к оценке уровня безопасного обращения с ВВ был применен также для построения расчетно-экспериментальных моделей развития самоподдерживающейся реакции в пласт-

тифицированных октогене и тэне в условиях неизотермического нагрева с разными скоростями нагрева. Результаты предварительных расчетов сравнивали с результатами испытаний в условиях, соответствующих расчетным. В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные данные по температуре и времени НСПР для каждого испытания.

Как видно из представленных в табл. 2 данных, результаты испытаний хорошо согласуются с данными математического моделирования поведения исследуемых взрывчатых веществ при нагреве.

Таблица 2

Результаты испытаний и математического моделирования нагрева образцов из пластифицированных тэна и октогена

Условия проведения эксперимента (размеры образца, скорость нагрева)	Условия возникновения НСПР	
	Эксперимент	Расчет
Нагрев образца из пластифицированного октогена (Ø15x15 мм; ~0,7 °C/мин)	НСПР: <b>240 мин</b> $T = 216\text{ °C}$	НСПР: 258 мин $T = 225\text{ °C}$
Нагрев образца из пластифицированного тэна (Ø15x15 мм; ~0,7 °C/мин)	НСПР: <b>149 мин</b> $T = 171\text{ °C}$	НСПР: 134 мин $T = 170\text{ °C}$
Нагрев образца из пластифицированного тэна (Ø15x15 мм; ~0,7 °C/мин)	НСПР: <b>150 мин</b> $T = 170\text{ °C}$	НСПР: 128 мин $T = 170\text{ °C}$
Нагрев образца из пластифицированного тэна (Ø15x15 мм; ~1,3 °C/мин)	НСПР: <b>113 мин</b> $T = 170\text{ °C}$	НСПР: 103 мин $T = 170\text{ °C}$
Нагрев образца из пластифицированного тэна (Ø15x15 мм; ~1,7 °C/мин)	НСПР: <b>90 мин</b> $T = 175\text{ °C}$	НСПР: 99 мин $T = 180\text{ °C}$



На примере пластифицированного тэна показано применение подхода к оценке уровня безопасного обращения с ВВ при воздействии на них тепловых потоков:

- методом дифференциально-сканирующей микрокалориметрии была исследована кинетика термического разложения ВВ;

- на основании полученных экспериментальных данных построена кинетическая модель термического разложения пластифицированного тэна;

- кинетическая модель использована в математической модели теплового взрыва ПО TSS.

Также представлены результаты прогнозирования поведения пластифицированного октогена в условиях неизотермического нагрева.

Прогнозирование поведения пластифицированных тэна и октогена в виде детали в процессе нагрева показало хорошее согласование построенной КМ с экспериментальными данными.

Полученные в работе результаты, основанные на использовании кинетических моделей термораспада ВВ с учетом многостадийности процесса, открывают перспективы для оценки реакционной безопасности изделий, содержащих ВВ, без проведения дополнительных дорогостоящих экспериментов по тепловому взрыву.

1. Kossoy A., Koludarova E. Specific features of kinetics evaluation in calorimetric studies of runaway reactions // *J. Loss Prev. Process Ind.* 1995. Vol. 8, N 4. P. 229.

2. Бенин А. И., Малинина И. В., Рипачев В. И. Программная система «Кинетика-1» для построения кинетического описания химических реакций в конденсированной фазе. Автоматизация разработки технологических процессов. Л.: ГИПХ, 1984.

3. Герман В. Н., Гребенникова С. Э., Корнилова Л. Е., Лобанова С. П. Термическое разложение взрывчатых веществ в широком диапазоне температур // Международная конференция. III Харитоновские тематические научные чтения. Россия. Саров. 26 февраля – 2 марта 2001.

4. Андреев К. К., Кайдымов Б. И. Термический распад тэна // Теория взрывчатых веществ. Сборник статей. М.: ОБОРОНГИЗ, 1963.

5. Коссой А. А., Шейман И. Применение кинетически основанных приближений для моделирования термического взрыва. С.-Петербург: ГИПХ, 2003.

6. Frank-Kamenetskii D. A. Diffusion and heat exchange in chemical kinetics. New York: Plenum Press. 1969.

7. Merzanov A. G., Dubovitski F. I. Quasi-stationary theory of thermal explosion of self-accelerating reactions // *J. Phys. Chem.* 1960. Vol. 34, N 10. P. 2235.

8. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982.



# СЕКЦИЯ 1

## Теоретическая и математическая физика

Председатель секции:  
канд. физ.-мат. наук В. И. Будников

---

---

# СХЕМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГРАНИ ЯЧЕЙКИ В МЕТОДИКЕ РАМЗЕС-КП

*Е. В. Авдошина*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Методика РАМЗЕС-КП [1] предназначена для расчета многомерных движений многокомпонентных теплопроводных сред в эйлерово-лагранжевых координатах на параллельных вычислительных системах с распределенной памятью.

Настоящая работа посвящена схеме решения уравнения теплопроводности с использованием температуры на грани ячейки. Для решения трехмерного уравнения теплопроводности в методике РАМЗЕС-КП применяется метод расщепления по направлениям в сочетании с неявной трехточечной схемой вдоль каждого пространственного направления. Для усреднения коэффициента теплопроводности на границу счетной ячейки в методике используется алгоритм гармонического усреднения [2], в котором температура на грани ячейки усредняется по температурам из центров соседних ячеек. Такой способ усреднения обеспечивает хорошую точность и используется в расчетах на протяжении длительного времени. С целью повышения точности расчетов Б. Л. Ворониным было предложено реализовать новый способ решения уравнения теплопроводности, при котором температура на грани ячейки определяется не усреднением по температурам из центров соседних ячеек, а является наряду с температурой в центре ячейки искомым решением. В этом случае число неизвестных возрастает, поэтому система конечно-разностных уравнений баланса внутренней энергии для ячеек вдоль строки дополняется конечно-разностными уравнениями, аппроксимирующими условия непрерывности односторонних потоков и температуры на границе ячейки.

## 1. Уравнение теплопроводности и метод решения

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(\chi \cdot \operatorname{grad} T), \\ \varepsilon &= \varepsilon(\rho, T), \\ \chi &= \chi(\rho, T). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь:  $\frac{d}{dt}$  – полная производная по времени;  $\rho$  – плотность;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $T$  – температура;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности.

В одномерном случае дифференциальное уравнение теплопроводности в криволинейных эйлерово-лагранжевых координатах принимает вид:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho dS_{23}} \frac{\partial}{\partial l_1} \left( \chi dS_{23} \frac{\partial T}{\partial l_1} \right). \quad (2)$$

Полученное дифференциальное уравнение будем аппроксимировать с помощью неявных конечно-разностных уравнений. Одномерное конечно-разностное уравнение, соответствующее (2), запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n}{\tau} &= \\ &= \frac{1}{(\rho S_{23} h)_{m+\frac{1}{2}}} \left\{ (\chi S_{23})_{m+1} \frac{T_{m+1}^{n+1} - T_{m+\frac{1}{2}}^{n+1}}{h_{m+\frac{1}{2}}} - \right. \\ &\quad \left. - (\chi S_{23})_m \frac{T_{m+\frac{1}{2}}^{n+1} - T_m^{n+1}}{h_{m+\frac{1}{2}}} \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Линеаризуя левую часть уравнения по методу Ньютона:

$$\varepsilon^{n+1} \approx \varepsilon^v + F^v (T^{v+1} - T^v), \quad (4)$$

где  $F^v = \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)^v$ , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon^v + F^v (T^{v+1} - T^v) - \varepsilon^n}{\tau} &= \\ &= \frac{1}{(\rho S_{23} h)_{m+\frac{1}{2}}} \left\{ (\chi S_{23})_{m+1} \frac{T_{m+1}^{n+1} - T_{m+\frac{1}{2}}^{n+1}}{h_{m+\frac{1}{2}}} - \right. \\ &\quad \left. - (\chi S_{23})_m \frac{T_{m+\frac{1}{2}}^{n+1} - T_m^{n+1}}{h_{m+\frac{1}{2}}} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $F^v = \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)^v$ .

Сведем уравнение (5) к системе трехточечных уравнений

$$A_m^v T_m^{v+1} + B_m^v T_{m+\frac{1}{2}}^{v+1} + C_m^v T_{m+1}^{v+1} = D_m^v, \quad m=1,2,\dots,M \quad (6)$$

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} A_{m+\frac{1}{2}}^v &= -\frac{\tau(\chi^v S_{23})_m}{q_{m+\frac{1}{2}} h_{m+\frac{1}{2}}}; \\ C_{m+\frac{1}{2}}^v &= -\frac{\tau(\chi^v S_{23})_{m+1}}{q_{m+\frac{1}{2}} h_{m+\frac{1}{2}}}; \\ B_{m+\frac{1}{2}}^v &= -A_{m+\frac{1}{2}}^v - C_{m+\frac{1}{2}}^v + F_{m+\frac{1}{2}}^v; \\ D_{m+\frac{1}{2}}^v &= \varepsilon_{m+\frac{1}{2}}^n - \varepsilon_{m+\frac{1}{2}}^v + F_{m+\frac{1}{2}}^v T_{m+\frac{1}{2}}^v. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения температуры на грани ячейки запишем условие непрерывности односторонних потоков с учетом условия равенства температур на грани ячейки:

$$Q_m^{left} = Q_m^{right} \Rightarrow \chi_m^{left} \frac{T_m - T_{m-\frac{1}{2}}}{h_{m-\frac{1}{2}}} = \chi_m^{right} \frac{T_{m+\frac{1}{2}} - T_m}{h_{m+\frac{1}{2}}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \chi_m^{left} = \chi_m(\rho_{m-\frac{1}{2}}, T_m), \quad \chi_m^{right} = \chi_m\left(\rho_{m+\frac{1}{2}}, T_m\right).$$

Перепишем уравнение (8) в трехточечном виде:

$$A_m^v T_{m-\frac{1}{2}}^{v+1} + B_m^v T_m^{v+1} + C_m^v T_{m+\frac{1}{2}}^{v+1} = D_m^v \quad (9)$$

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} A_m^v &= -\frac{\chi_m^{left,v}}{h_{m-\frac{1}{2}}}, \quad C_m^v = -\frac{\chi_m^{right,v}}{h_{m+\frac{1}{2}}}, \\ B_m^v &= \frac{\chi_m^{left,v}}{h_{m-\frac{1}{2}}} + \frac{\chi_m^{right,v}}{h_{m+\frac{1}{2}}} = -A_m^v - C_m^v, \\ D_m^v &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

$$T(x,t) = \begin{cases} \begin{cases} \sqrt{20 \cdot (5t-x)} & 5t \geq x \\ 0 & 5t < x \end{cases} & 0 \text{ см} \leq x \leq 0,5 \text{ см;} \\ \begin{cases} \sqrt{2 \cdot (50t-x-4,5)} & 50t-x-4,5 \geq 0 \\ 0 & 50t-x-4,5 < 0 \end{cases} & 0,5 \text{ см} \leq x \leq 1 \text{ см.} \end{cases} \quad (16)$$

Полученные системы трехточечных уравнений (6) и (9) решаются совместно методом прогонки.

Прямой ход прогонки:

$$\alpha_{m+\frac{1}{2}} = -\frac{C_{m+\frac{1}{2}}}{A_{m+\frac{1}{2}} \alpha_m + B_{m+\frac{1}{2}}}, \quad \beta_{m+\frac{1}{2}} = \frac{D_{m+\frac{1}{2}} - A_{m+\frac{1}{2}} \beta_m}{A_{m+\frac{1}{2}} \alpha_m + B_{m+\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

$$\alpha_m = -\frac{C_m}{A_m \alpha_{m-\frac{1}{2}} + B_m}, \quad \beta_m = \frac{D_m - A_m \beta_{m-\frac{1}{2}}}{A_m \alpha_{m-\frac{1}{2}} + B_m}.$$

Обратный ход прогонки:

$$T_{m+\frac{1}{2}} = \alpha_{m+\frac{1}{2}} T_{m+1} + \beta_{m+\frac{1}{2}}; \quad (12)$$

$$T_m = \alpha_m T_{m+\frac{1}{2}} + \beta_m.$$

## 2. Тестовый расчет. Задача о бегущей тепловой волне

На отрезке  $0 \text{ см} \leq x \leq 1 \text{ см}$  в начальный момент времени задана температура  $T(x,0) = 0 \text{ кэВ}$ . На границах навязываются следующие условия:

$$T(x,t) = 10\sqrt{t}, \quad x = 0 \text{ см}; \quad (13)$$

$$T(x,t) = 0, \quad x = 1 \text{ см}.$$

Протекающий процесс описывается нелинейным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \text{div}(\chi \cdot \text{grad} T) \quad (14)$$

со следующими характеристиками:

$$E = T, \quad \chi = 0,5 \cdot T^2, \quad \text{при } 0 \text{ см} \leq x \leq 0,5 \text{ см}; \quad (15)$$

$$E = 0,1 \cdot T, \quad \chi = 5 \cdot T^2, \quad \text{при } 0,5 \text{ см} \leq x \leq 1 \text{ см}.$$

Задача имеет аналитическое решение [3]:

Расчеты проводились с шагом по времени  $25 \cdot 10^{-6}$  мкс.

В качестве погрешности расчета выдавалось значение относительной нормы погрешности  $\delta$  типа  $L_1$ :

$$\delta(t) = \left\| T^{(\text{расчет})}(t) - T^{(\text{аналит})}(t) \right\|_{L_1} = \frac{\sum_{\alpha \in Я} M_{\alpha} \left| T_{\alpha}^{(\text{расчет})}(t) - T_{\alpha}^{(\text{аналит})}(t) \right|}{\sum_{\alpha \in Я} M_{\alpha} \left| T_{\alpha}^{(\text{аналит})}(t) \right|} \cdot 100\%. \quad (17)$$

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов на сходимость по гармоническому усреднению коэф-

фициента теплопроводности и новому способу решения уравнения теплопроводности по первому направлению. На рис. 3 приведено сравнение результатов расчетов по новой схеме решения уравнения теплопроводности по первому и второму направлениям.

В табл. 1 представлена информация об относительной погрешности в расчетах по старому и новому алгоритмам.

На рис. 4–7 представлены зависимости относительной нормы погрешности от времени в расчетах на сходимость. На рис. 8 представлена зависимость отношения времен счета задачи от числа ячеек.

В табл. 2 представлена информация о временах счета задачи по обоим алгоритмам.

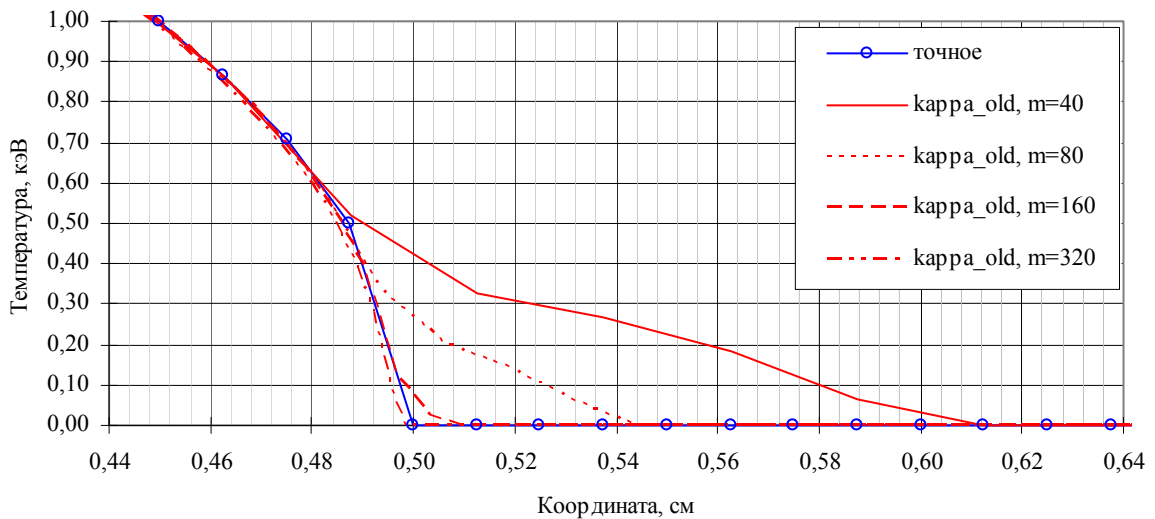


Рис. 1. График зависимости температуры от расстояния на фронте тепловой волны в сравнении с точным решением на момент времени  $t = 0,01$  мкс с разным количеством точек (алгоритм гармонического усреднения)

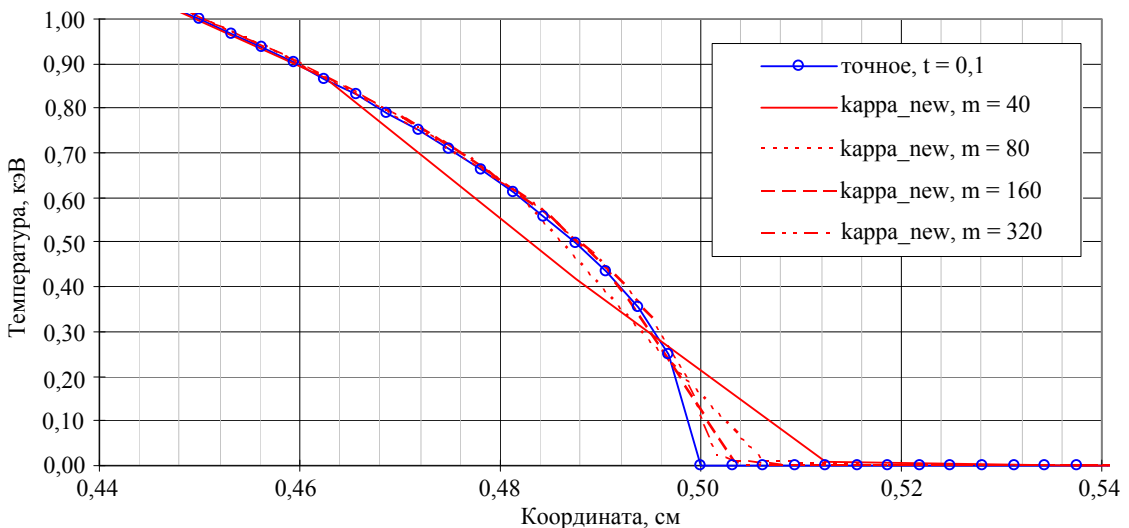


Рис. 2. График зависимости температуры от расстояния на фронте тепловой волны в сравнении с точным решением на момент времени  $t = 0,01$  мкс с разным количеством точек (новый алгоритм)



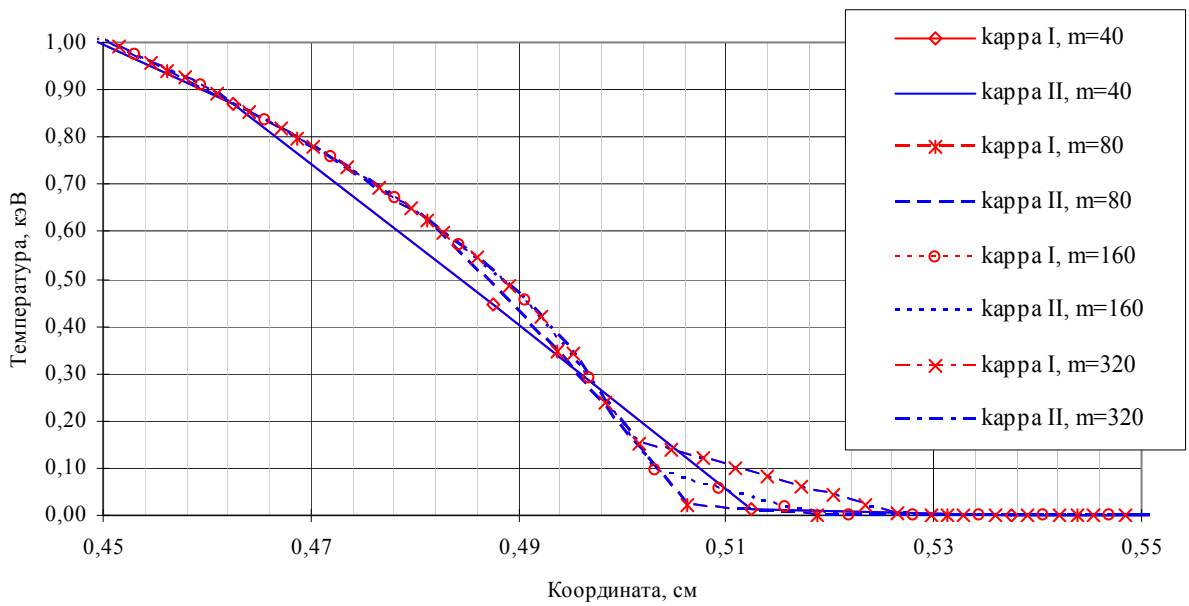


Рис. 3. График зависимости температуры от расстояния на фронте тепловой волны по первому и второму направлениям на момент времени  $t = 0,01$  мкс (новый алгоритм)

Таблица 1

Относительная норма погрешности  $\delta$  на момент времени 0,0099 мкс, в %

Число точек	Старый алгоритм	Новый алгоритм	$\delta_{\text{ст}}/\delta_{\text{нов}}$
$m = 40$	1,1129	0,2895	3,84
$m = 80$	0,2967	0,0795	3,73
$m = 160$	0,3092	0,1271	2,43
$m = 320$	0,3544	0,1431	2,48

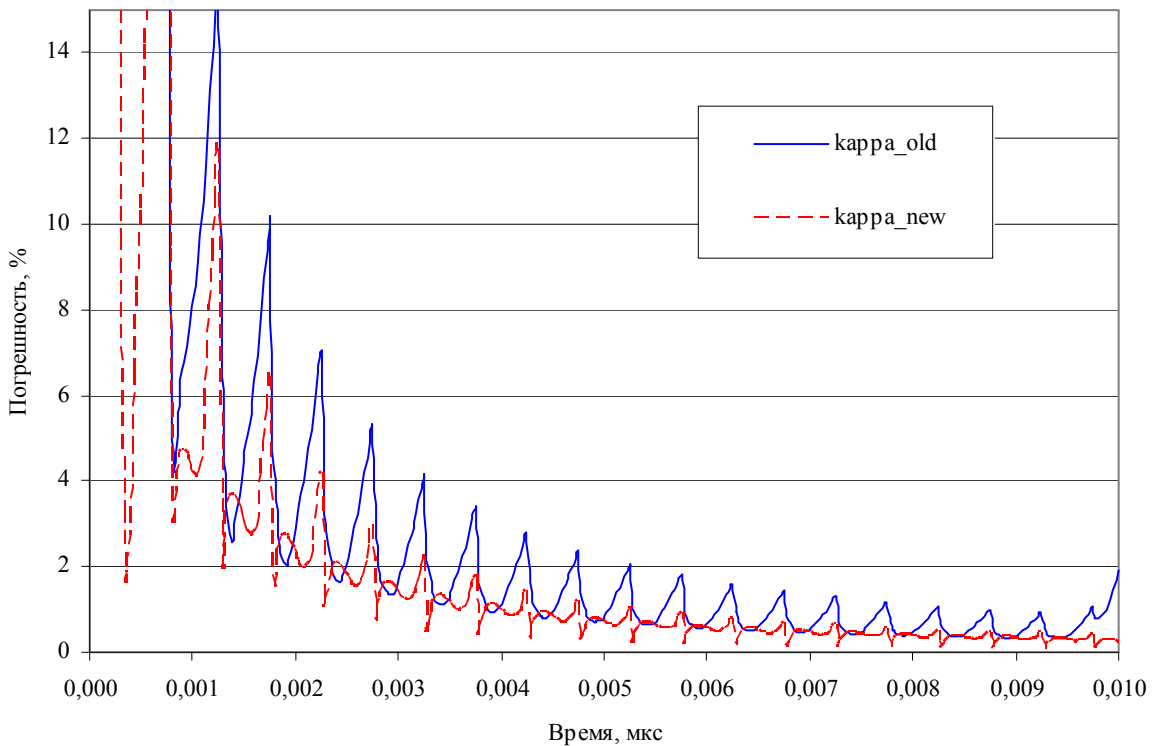


Рис. 4. График зависимости относительной нормы погрешности от времени,  $m = 40$

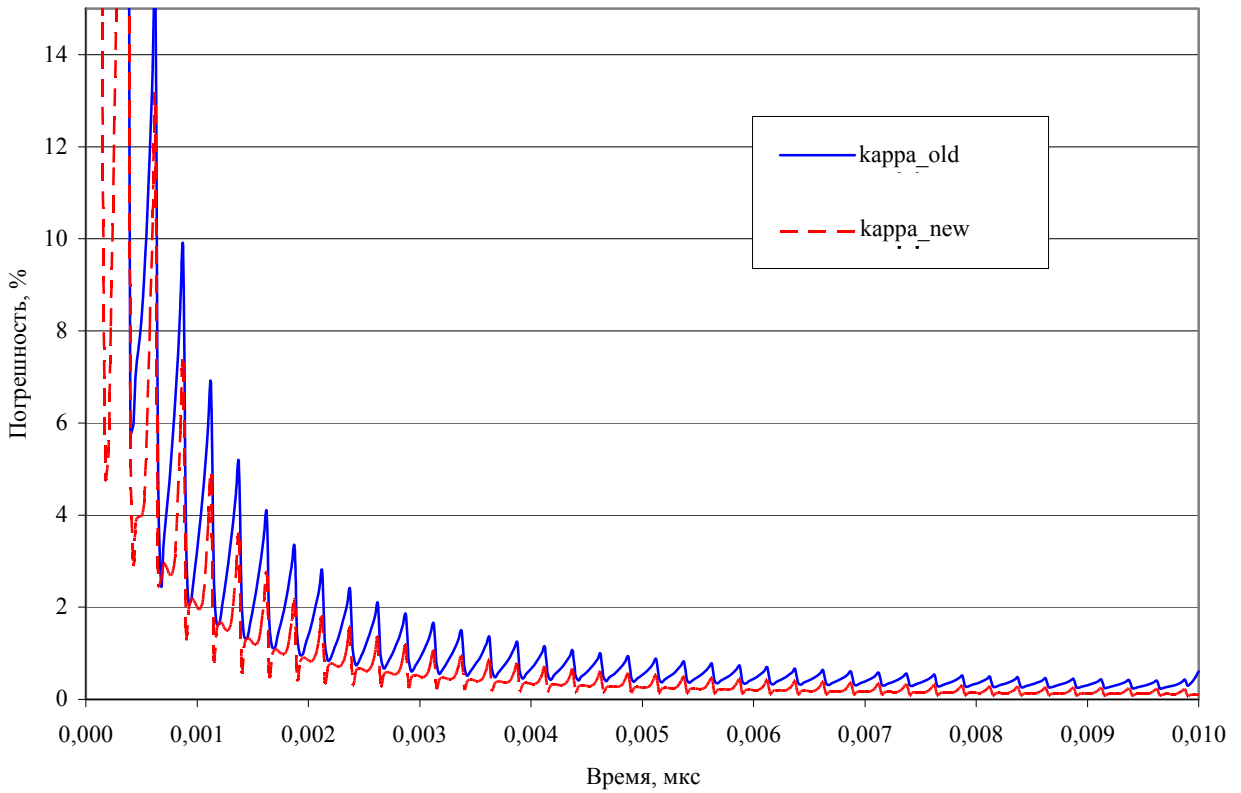


Рис. 5. График зависимости относительной нормы погрешности от времени,  $m = 80$

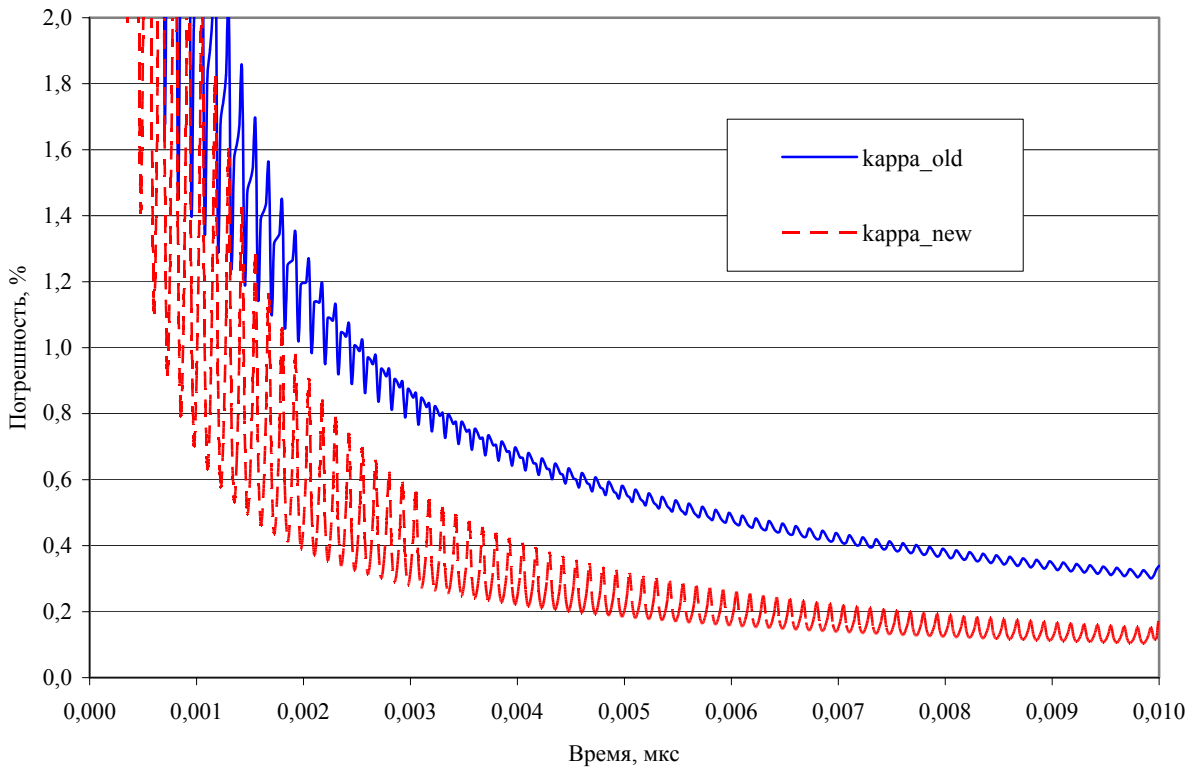


Рис. 6. График зависимости относительной нормы погрешности от времени,  $m = 160$

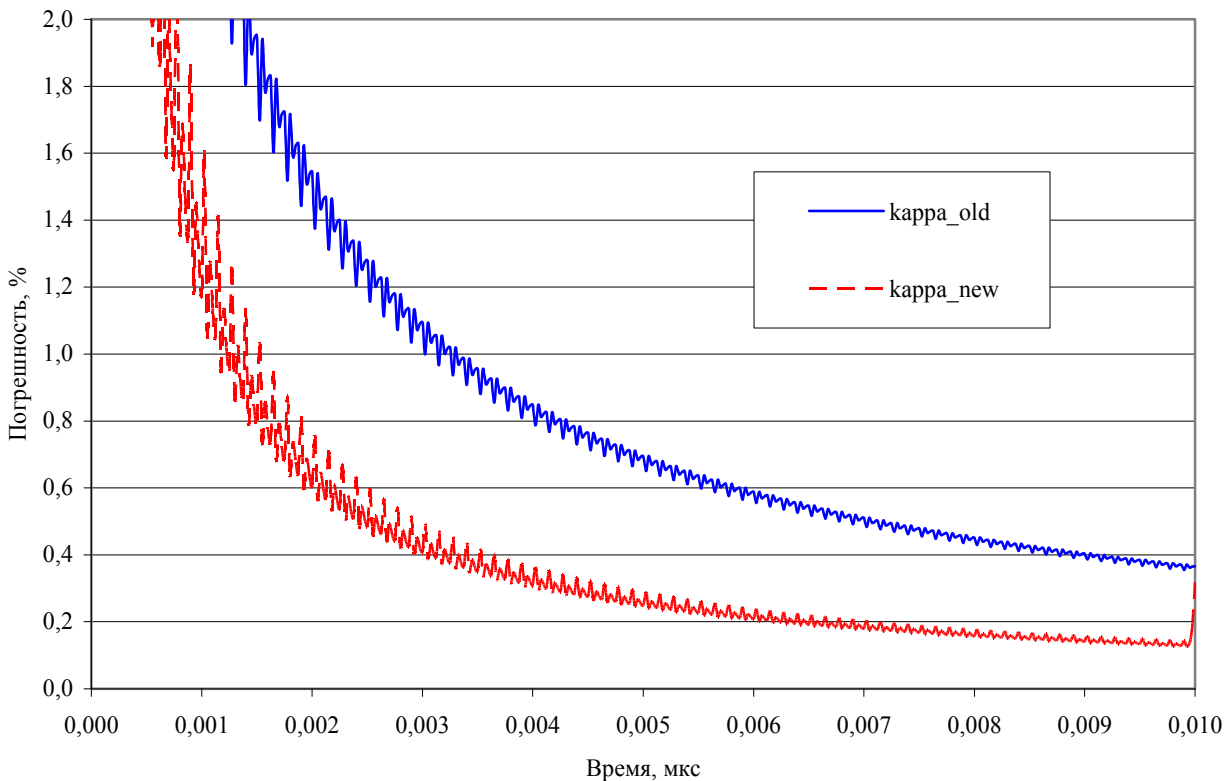


Рис. 7. График зависимости относительной нормы погрешности от времени,  $m = 320$

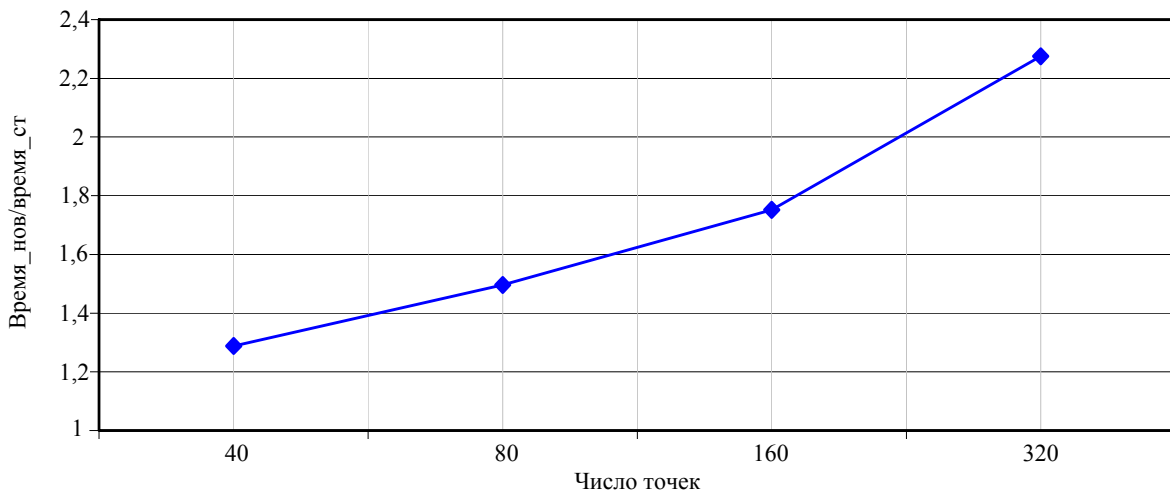


Рис. 8. Оценка быстродействия

Таблица 2

Оценка быстродействия (время счета задачи, с)

Число точек	Старый алгоритм	Новый алгоритм	Время_нов/Время_ст
$m = 40$	4,080	5,256	1,288
$m = 80$	4,195	6,276	1,496
$m = 160$	4,438	7,778	1,752
$m = 320$	4,997	11,369	2,275

Из анализа представленных зависимостей видно, что при измельчении сетки численное решение как по гармоническому усреднению, так и новому способу решения уравнения теплопроводности сходится к точному решению, но новый способ решения сходится быстрее. Алгоритм гармонического усреднения дает большее размазывание тепловой волны по сравнению с новым алгоритмом. На контактной границе двух веществ с разными коэффициентами теплопроводности решение по новой схеме лежит ближе к точному, чем решение по алгоритму гармонического усреднения. Из представленных выше таблиц видно, что с повышением точности расчетов увеличилось и время счета задачи.

### **Заключение**

В настоящей работе описан новый способ решения уравнения теплопроводности, при котором температура на грани ячейки определяется не усреднением по температурам из центров соседних ячеек,

а является наряду с температурой в центре ячейки искомым решением. Результаты тестовых расчетов показали работоспособность нового алгоритма и его преимущества перед алгоритмом гармонического усреднения.

### **Литература**

1. Софронов И. Д., Воронин Б. Л., Скрыпник С. И., Быков А. Н. и др. Методика и комплексы программ РАМЗЕС, РАМЗЕС-КП // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 27–31.
2. Дмитриев Н. А., Софронов И. Д., Тихомиров Б. П. Методика расчета одномерных многообластных задач высокотемпературной газовой динамики // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 3. С. 3–8.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.

# МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЛНИИ, ОСНОВАННЫЙ НА РАЗВИТИИ ЛАВИН РЕЛЯТИВИСТСКИХ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Е. И. Бочков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Проблема инициирования разряда молнии остается одной из нерешенных задач физики атмосферного электричества, несмотря на долгую историю исследований. Ясно, что для старта лидера молнии напряженность электрического поля в некотором объеме грозового облака должна возрастать до величины, обеспечивающей лавинообразное размножение электронов в результате ударной ионизации молекул воздуха электронами. Для пробоя сухого воздуха нормальной плотности необходима напряженность однородного поля не ниже  $E_{br} \approx 26$  кВ/см [1]. С увеличением высоты величина  $E_{br}$  уменьшается прямо пропорционально плотности воздуха. При наличии осадков (precipitations) порог пробоя уменьшается до  $E_{br, pr} \approx 10-14$  кВ/см в зависимости от размера и формы частиц осадков [2]. Интрига состоит в том, что значения напряженности поля, измеряемые внутри грозовых облаков, нормированные на

нормальные условия, не превышают 3–4 кВ/см [3], т. е. в три раза меньше  $E_{br, pr}$ .

Одна из перспективных гипотез связывает инициирование разряда молнии с развитием в атмосфере лавин релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ), инициируемых электронами вторичного космического излучения [4]. Получены экспериментальные свидетельства связи между процессами инициирования молнии и генерации УЭ высоких энергий в грозовой атмосфере. Так, во время удара молнии внутри грозовых облаков зарегистрированы поля с напряженностью (см. рис. 1) [5], близкой к пороговой величине, при которой в воздухе теоретически возможно убежание электронов  $E_{тин} = 2,18 \cdot 10^5 \cdot P$  кВ/(см·атм.), где  $P$  – давление, выраженное в атмосферах [6]. В грозовых облаках зарегистрировано усиление рентгеновского излучения, которое прекращалось во время удара молнии (см. рис. 2) [7]. Единственным источником усиления может быть тормозное излучение электронов достаточно высоких энергий.

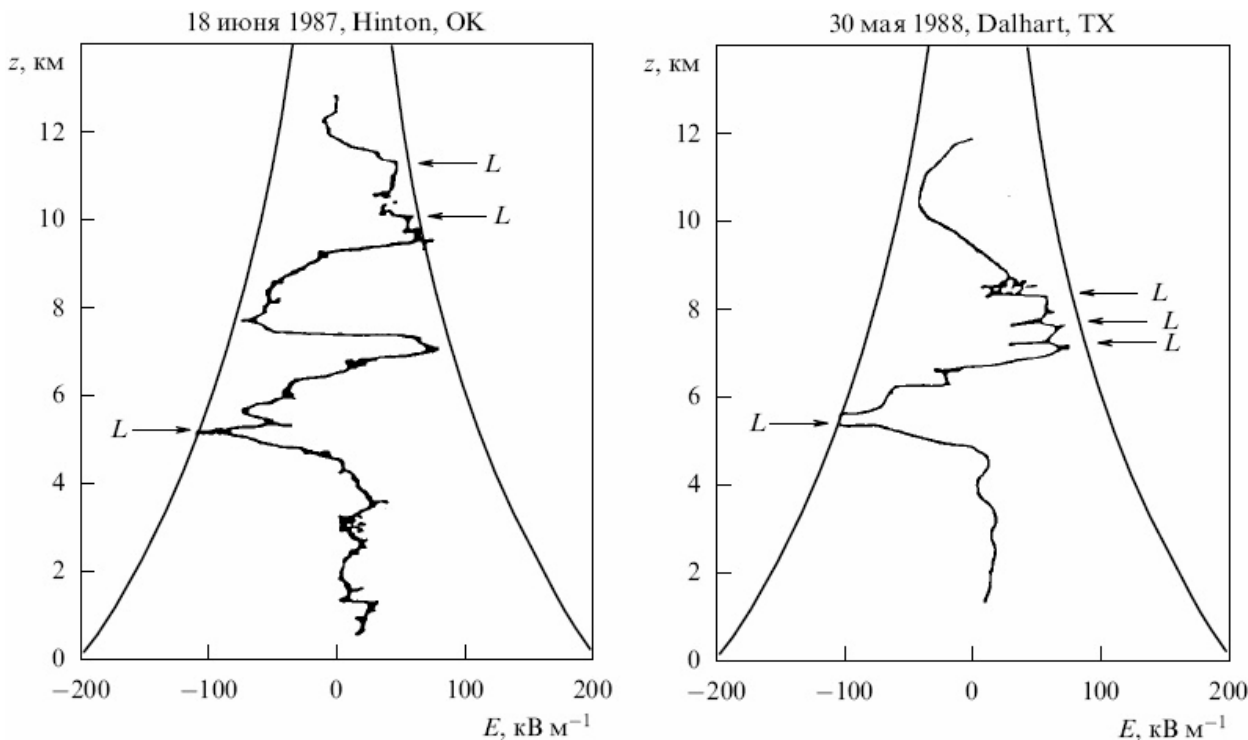


Рис. 1. Сопоставление измеренного электрического поля [5] с величиной пороговой напряженности поля, при которой теоретически возможно убежание электронов. Стрелки  $L$  (lightning) фиксируют вспышки молнии

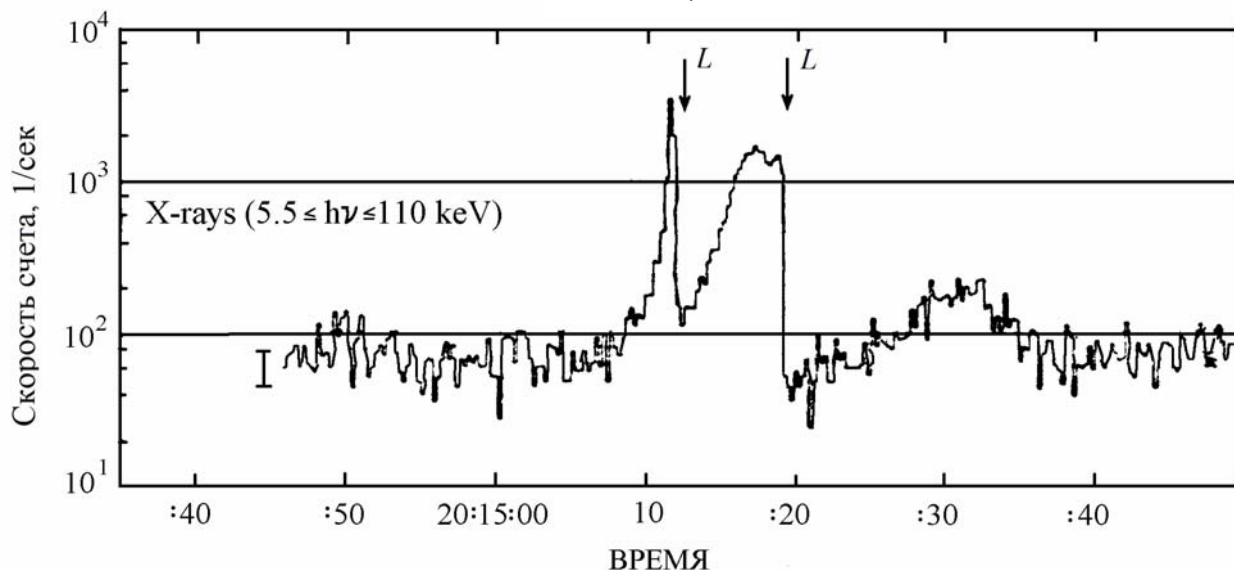


Рис. 2. Временная зависимость скорости счета рентгеновских фотонов [7]. Стрелки L фиксируют моменты вспышки молнии (lightning)

Механизм инициирования лидера молнии с участием ЛРУЭ выглядит следующим образом. УЭ, сталкиваясь с молекулами воздуха, генерируют большое количество электрон-ионных пар, в результате чего в атмосфере возникает ионизованная область, поляризация которой в грозовом поле приводит к локальному усилению электрического поля до пробойного значения. В работе [8] выполнена оценка этого процесса для случая, когда источником затравочных УЭ является широкий атмосферный ливень (ШАЛ), инициируемый космической частицей с энергией  $> 10^{15}$  эВ. Однако численным моделированием эволюции в грозовом поле проводящего канала, созданного совместным действием ШАЛ и ЛРУЭ, показано, что данный механизм требует либо нереально больших значений энергии первичной космической частицы, инициирующей ШАЛ ( $\sim 10^{20}$  эВ), либо формирования в атмосфере не наблюдавшихся до сих пор протяженных электрических полей с напряженностью 7–10 кВ/см [9].

Помимо ШАЛ единственным источником затравочных УЭ остается стационарное фоновое космическое излучение. Дуайер (Dwyer) выполнил численное моделирование развития ионизованной области, формирующейся в результате предьонизации атмосферы релятивистскими лавинами, инициируемыми фоновым космическим излучением [10]. В результате поляризации получены значения напряженности поля  $\sim 12$  кВ/см, достаточные для старта разряда в присутствии осадков. Дуайером учитывался механизм релятивистской обратной связи (relativistic feedback) [11], существенно увеличивающий скорость генерации ЛРУЭ и, как следствие, приводящий к быстрому росту проводимости атмосферы. Благодаря включению в модель обратной связи резко, за времена порядка нескольких миллисекунд, возрастает число УЭ, гене-

рирующих жесткое тормозное излучение. Однако характерное время нарастания импульса рентгеновского излучения, наблюдавшегося в натуральных экспериментах [7], относится к диапазону единиц – десятков секунд (см. рис. 2), что не согласуется с участием релятивистской обратной связи в процессе генерации молнии.

В связи с фундаментальностью проблемы инициирования разряда молнии в физике атмосферного электричества и несомненной привлекательностью гипотезы об инициировании молнии фоновым космическим излучением, усиленным генерацией ЛРУЭ, необходимы дальнейшие исследования. В предлагаемой работе разработана двумерная численная модель разряда в атмосфере с участием УЭ, электронов низких энергий, положительных и отрицательных ионов. Выполнено моделирование процесса формирования ионизованной области, поляризация которой без участия механизма релятивистской обратной связи порождает локальные поля с напряженностью, достаточной для инициирования молнии.

### Математическая формулировка задачи о развитии разряда в самосогласованном электрическом поле

Исследования процессов в грозовом поле с участием ЛРУЭ ведутся в терминах перенапряжения электрического поля  $\delta = eE / (F_{\min} P)$  относительно минимума силы трения, действующей на электрон в воздухе  $F_{\min} = 2,18 \cdot 10^5 \cdot P$  кВ/(см · атм). Напряженности пробивного поля в сухом воздухе ( $E_{br} \approx 26$  кВ/см) и в присутствии осадков ( $E_{br, pr} \approx 10-14$  кВ/см) соот-



ветствуют  $\delta_{br} \approx 11,5$  и  $\delta_{br, pr} \approx 4,5 - 6,5$ . Развитие ЛРУЭ в воздухе возможно, начиная с  $\delta_{th} = 1,3$  [6], чему соответствует критическая напряженность поля  $E_{th} = 2,83$  кВ/см при нормальных условиях. То обстоятельство, что пороговое значения  $\delta_{th}$  больше 1, обусловлено рассеянием электронов на молекулах, в результате чего они движутся под некоторым углом к направлению электрической силы  $-e\vec{E}$ .

В данной работе мы полагаем, что внешнее электрическое поле создается верхним положительным  $Q_p$  и равным ему по абсолютной величине нижним отрицательным  $Q_n$  зарядами, пространственная плотность которых распределена по закону Гаусса в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \rho_p(z, r, t) &= \\ &= \frac{Q_p(t)}{\pi\sqrt{\pi}l_{z,p}l_{r,p}^2} \exp\left(-\frac{(z-z_p)^2}{l_{z,p}^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{l_{r,p}^2}\right), \\ \rho_n(z, r, t) &= \\ &= \frac{Q_n(t)}{\pi\sqrt{\pi}l_{z,n}l_{r,n}^2} \exp\left(-\frac{(z-z_n)^2}{l_{z,n}^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{l_{r,n}^2}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $z$  и  $r$  – вертикальная и радиальная координаты,  $z_p$  и  $z_n$  – координаты центров «тяжести» зарядов  $l_{z,n}$ ,  $l_{r,n}$ ,  $l_{z,p}$ ,  $l_{r,p}$  – ширины распределений.

Полагается, что заряд возмущения нарастают по линейному закону с характерным временем  $t_{ch}$ :

$$Q_p(t) = -Q_n(t) = k_{ch}t, \quad (2)$$

где  $k_{ch}$  – скорость нарастания заряда.

Кинетика УЭ в электрическом поле моделируется диффузионно-дрейфовым уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{re}}{\partial t} + \text{div}\left(n_{re}\vec{v}_{re} - D_T\left(\vec{\nabla}n_{re} - \vec{v}_{re}\left(\vec{v}_{re}\vec{\nabla}n_{re}\right)/v_{re}^2\right) - \right. \\ \left. - D_L\vec{v}_{re}\left(\vec{v}_{re}\vec{\nabla}n_{re}\right)/v_{re}^2\right) = -v_t n_{re} + \frac{n_{re}}{t_e} + S_{re}, \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $n_{re}$  – концентрация УЭ;  $v_t$  – частота термализации УЭ;  $\vec{v}_{re} = -u\vec{E}/E$  – вектор и  $u$  – абсолютная величина направленной скорости УЭ;  $D_T$  и  $D_L$  – коэффициенты поперечной и продольной диффузии УЭ;  $t_e$  – характерное время усиления ЛРУЭ в  $e$  раз;  $S_{re}$  – обусловленный фоновым космическим излучением внешний источник УЭ.

Зависимости кинетических коэффициентов от  $\delta$  вычислены методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА:  $u$ ,  $D_T$ ,  $D_L$ ,  $t_e$  [6]. Направленная скорость УЭ  $u$  практически не зависит от напряженности поля (для  $\delta$  от 1,5 до 100), причем с хорошей точно-

стью  $u = 0,9c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Для коэффициентов диффузии в диапазоне  $\delta = 1,5 - 14$  получены следующие аппроксимации с погрешностью не превышающей 13 %:

$$D_L [\text{м}^2/\text{с}] = 2,687 \cdot 10^8 \cdot \delta^{-1,715}, \quad (4)$$

$$D_T [\text{м}^2/\text{с}] = 1,246 \cdot 10^9 \cdot \delta^{-1,973}.$$

Зависимость частоты термализации УЭ от  $\delta$  получена на основании следующих соображений. При движении через среду в поле с  $\delta < 1,3$  на УЭ действует сила торможения, равная по модулю  $(F_{\min} P - \langle \mu_{re} \rangle E)$ , где  $\langle \mu_{re} \rangle$  – средний косинус угла между направлением вектора скорости электрона и направлением напряженности поля. Как следствие, УЭ теряет свою энергию со скоростью  $(1 - \langle \mu_{re} \rangle \delta) F_{\min} P u$ , так что

$$v_t = \left( (1 - \langle \mu_{re} \rangle \delta) F_{\min} P u \right) / \langle \epsilon_{re} \rangle, \quad (5)$$

где средняя энергия электронов в ЛРУЭ  $\langle \epsilon_{re} \rangle \approx 7$  МэВ [6]. Поскольку ЛРУЭ способны развиваться в воздухе, начиная с  $\delta = 1,3$ , то  $v_t(\delta = 1,3) = 0$ , и поэтому из (5) следует  $1 / \langle \mu_{re} \rangle = 1,3$ . Подставляя в (5) эту величину и численные значения  $u$ ,  $F_{\min}$  и  $\langle \epsilon_{re} \rangle$ , получаем следующую формулу:

$$v_t [\text{с}^{-1}] = 1/t_t = \begin{cases} (1,3 - \delta) P \cdot 10^7, & \delta < 1,3; \\ 0, & \delta \geq 1,3. \end{cases} \quad (6)$$

Зависимость источника УЭ  $S_{re}$  от  $\delta$  вычислена методом Монте-Карло по специально написанной программе [12].

Кинетика электронов низких энергий, а также положительных и отрицательных ионов описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div} n_e \vec{v}_e = (v_{ion} - v_{att}) n_e - \beta_{e+} n_e n_+ + v_{e+} n_{re} + S_{e+}, \\ \frac{\partial n_+}{\partial t} + \text{div} n_+ \vec{v}_+ = \\ = v_{ion} n_e - \beta_{e+} n_e n_+ - \beta_{+-} n_+ n_- + v_{e+} n_{re} + S_{e+}, \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $n_e, n_+, n_-$  – концентрации;  $\vec{v}_e = -\mu_e \vec{E}$ ,  $\vec{v}_+ = \mu_+ \vec{E}$ ,  $\vec{v}_- = -\mu_- \vec{E}$  – скорости дрейфа,  $\mu_e$  и  $\mu_{\pm}$  – подвижности электронов и ионов;  $v_{ion}$  – частота ионизации молекул воздуха электронами низких энергий;  $\beta_{e+}$  и  $\beta_{+-}$  – коэффициенты рекомбинации электронов с положительными ионами и положительных и отрицательных ионов;  $v_{att} = [K_{diss} + K_{thr} N(z)] N_{O_2}(z)$  – частота прилипания

электронов к молекулам кислорода,  $K_{thr}$  и  $K_{diss}$  – коэффициенты тройного и диссоциативного прилипания,  $N(z)$  и  $N_{O_2}(z)$  – локальные концентрации молекул воздуха и кислорода на высоте  $z$ ;  $v_{e+}$  – частота генерации электронов низких энергий в соударениях УЭ с молекулами;  $S_{e+}$  – внешний источник электронов и положительных ионов от фонового космического излучения.

Локальные концентрации молекул воздуха и кислорода следующим образом зависят от высоты  $N(z) = 2,688 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} P(z)$  и  $N_{O_2}(z) = 0,2 \cdot N(z)$ .

Скорость генерации электронов низких энергий в ионизирующих соударениях УЭ выражается через цену образования одной электрон-ионной пары в воздухе  $\Delta \epsilon_{ion} \approx 32 \text{ эВ}$ :

$$v_{e+}[c^{-1}] = F_{\min} Pu / \Delta \epsilon_{ion} = 2 \cdot 10^{12} P, \quad (8)$$

Для зависимостей остальных кинетических коэффициентов от  $E$  и  $P$  приняты следующие аппроксимации. Для частоты ионизации электронами низких энергий и коэффициентов [13]:

$$\begin{aligned} v_{ion}[c^{-1}] &= 10^{-14,8-28,1/\xi} N(z), \\ K_{thr}[M^6/c] &= (4,7 - 0,25\xi) \cdot 10^{-43}, \\ K_{diss}[M^3/c] &= \begin{cases} 10^{-15,3-12,3/\xi}, & \xi \leq 8; \\ 10^{-16,8-5,7/\xi}, & \xi > 8. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\xi = 10^{20} (\text{В} \cdot \text{м}^3)^{-1} E / N(z)$ . Для подвижности ионов  $\mu_{\pm}[M^2/(\text{В} \cdot \text{с})] = 2 \cdot 10^{-4} / P$  [14]. Для коэффициентов рекомбинации  $\beta_{e+}[M^3/c] = 2 \cdot 10^{-13} P$  и  $\beta_{+-}[M^3/c] = 2 \cdot 10^{-12} P$  [13]. Скорость дрейфа электронов [15]:

$$v_e[M/c] = \begin{cases} 1,47 \cdot 10^4 x, & 0 \leq x < 0,251; \\ 0,737 \cdot 10^4 x^{1/2}, & 0,251 \leq x < 6,65; \\ 0,459 \cdot 10^4 x^{3/4}, & 6,65 \leq x < 421; \\ 2,08 \cdot 10^4 x^{1/2}, & 421 \leq x \leq 6860. \end{cases} \quad x = \frac{E}{3 \cdot 10^4 \text{В/м} \cdot P} \quad (10)$$

Космический источник электрон-ионных пар  $S_{e+}$  вычислен методом Монте-Карло [12].

Система уравнений (3), (7) замыкается уравнением Пуассона для потенциала самосогласованного электрического поля:

$$\Delta \varphi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_+ - n_- - n_e - n_{re}) - \frac{(\rho_p + \rho_n)}{\epsilon_0}, \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi, \quad (11)$$

здесь  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

В качестве начальных условий для (7) принято стационарное решение системы в отсутствии элект-

рического поля. Из численных расчетов следует, что решение в этом случае хорошо описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} n_+ &= n_- = \sqrt{S_{e+} / \beta_{+-}}, \\ n_e &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

что объясняется большой скоростью прилипания электронов с формированием отрицательных ионов кислорода. Таким образом, получаются следующие начальные условия для системы (3):

$$\begin{aligned} n_+(\vec{r}, t=0) &= n_-(\vec{r}, t=0) = \sqrt{S_{e+}(z) / \beta_{+-}(z)}, \\ n_e(\vec{r}, t=0) &= 0, \\ n_{re}(\vec{r}, t=0) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

На границе расчетной области принято следующее условие для концентраций частиц:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial \vec{n}} \right|_{\vec{r}_{bound}} = 0, \quad (14)$$

где  $F = \{n_+, n_-, n_e, n_{re}\}$  и  $\vec{n}$  – вектор нормали к границе, определяемой радиусом – вектором  $\vec{r}_{bound}$ . Выбор данного граничного условия обусловлен тем фактом, что на границе концентрации практически не меняются.

Потенциал на границе расчетной области обычно вычисляется следующим образом:

$$\varphi(\vec{r}_{bound}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{e(n_+ - n_- - n_e - n_{re})dV}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}|}, \quad (15)$$

где интегрирование ведется по объему расчетной области, занятой пространственным зарядом.

Однако данный метод неэффективен и в нашем случае требует больших затрат времени на вычисление интеграла (15) в каждой граничной точке, превышающих затраты на численное решение уравнения Пуассона (11). Для вычисления потенциала на границе мы воспользовались тем, что точность вычисления потенциала на границе не очень важна и основная часть пространственного заряда сосредоточена вблизи центра расчетной области. Поэтому потенциал вычисляется разложением по мультипольным моментам до квадрупольного момента включительно:

$$\varphi(\vec{r}_{bound}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{Q_+}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_+|} + \frac{Q_-}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_-|} + \frac{(\vec{r}_{bound} - \vec{r}_+, \vec{d}_+)}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_+|^3} + \frac{(\vec{r}_{bound} - \vec{r}_-, \vec{d}_-)}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_-|^3} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 D_+^{ij} \frac{(x_{bound}^i - x_+^i)(x_{bound}^j - x_+^j)}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_+|^5} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 D_-^{ij} \frac{(x_{bound}^i - x_-^i)(x_{bound}^j - x_-^j)}{|\vec{r}_{bound} - \vec{r}_-|^5} \right], \quad (16)$$

где  $Q_{\pm} = \int_V \rho_{\pm}(\vec{r}) dV$  – заряды;  $\vec{r}_{\pm} = \int_V \vec{r} \rho_{\pm}(\vec{r}) dV / Q_{\pm}$  – радиусы-векторы центров масс заряда;  $\vec{d}_{\pm} = \int_V (\vec{r} - \vec{r}_{\pm}) \rho_{\pm}(\vec{r}) dV$  – дипольные моменты;  $D_{\pm}^{ij} = \int_V \left( 3(x^i - x_{\pm}^i)(x^j - x_{\pm}^j) - \delta_{ij} |\vec{r} - \vec{r}_{\pm}|^2 \right) \rho_{\pm}(\vec{r}) dV$  – тензоры квадрупольного момента,  $\rho_{\pm} = 0,5(\rho_{\pm} | \rho |)$ .

Поскольку в процессе развития разряда положительный заряд, в основном, сосредоточен в головной части прорастающего канала, а отрицательный – в его теле, целесообразно выделить отдельно подсистемы положительного и отрицательного заряда, что позволяет повысить точность расчета потенциала на границе данным методом.

Отметим, что в виду цилиндрической симметрии задача является двумерной.

## Результаты расчетов и их анализ

На основании модели, изложенной выше, проведено моделирование разряда. Система уравнений (3), (7), (11) решалась численно в пространственной области:  $[Z_{min} = 4 \text{ км}; Z_{max} = 8 \text{ км}] \times [0; R_{max} = 1,3 \text{ км}]$ . Для решения уравнений (3), (7) использовалась явная схема первого порядка точности по пространственной координате (UPWIND). Шаг по времени при решении системы уравнений (7), (11)  $\Delta t = 10^{-5}$  с по-

добран, чтобы выполнялось условие Куранта для уравнений (7) и кроме того  $\Delta t < 0,1 \cdot \tau_m$ , где  $\tau_m = \epsilon_0 / \sigma$  – максвелловское время релаксации поля. Исходя из условия Куранта, для уравнения (3) принят временной шаг  $\Delta t_{re} = 10^{-9}$  с. Поскольку по мере развития проводящий канал прорастает вниз, принята адаптивная пространственная сетка: в области головки канала шаг по оси  $z$  был  $\Delta z = 2 \text{ м}$  в остальной части расчетной области  $\Delta z = 10 \text{ м}$ , по оси  $r$  использована неравномерная сетка с экспоненциально растущим шагом, на оси  $\Delta r = 2 \text{ м}$ .

Проведены расчеты для различных конфигураций грозового поля, параметры которого определяются формулами (1)– (2). Ниже приведены результаты для случая:  $l_{z,n} = l_{z,p} = 300 \text{ м}$ ,  $l_{r,n} = l_{r,p} = 500 \text{ м}$ ,  $Z_p = 5 \text{ км}$ ,  $Z_n = 7 \text{ км}$ ,  $k_{ch} = 2,17 \text{ Кл/с}$ . На рис. 3 показано пространственное распределение перенапряжения поля в момент достижения пробойного значения в головке канала  $t = 7,5 \text{ с}$ . В этот момент заряд облака составлял примерно 16 Кл, что вполне соответствует наблюдаемым значениям [16]. Максимальная разность потенциалов при этом равна 350 МВ. На рис. 4 показано изменение суммарного числа УЭ по мере развития разряда. Видно, что количество УЭ растет практически по экспоненциальному закону, что качественно позволяет объяснить усиления потока рентгеновских фотонов перед вспышкой молнии.

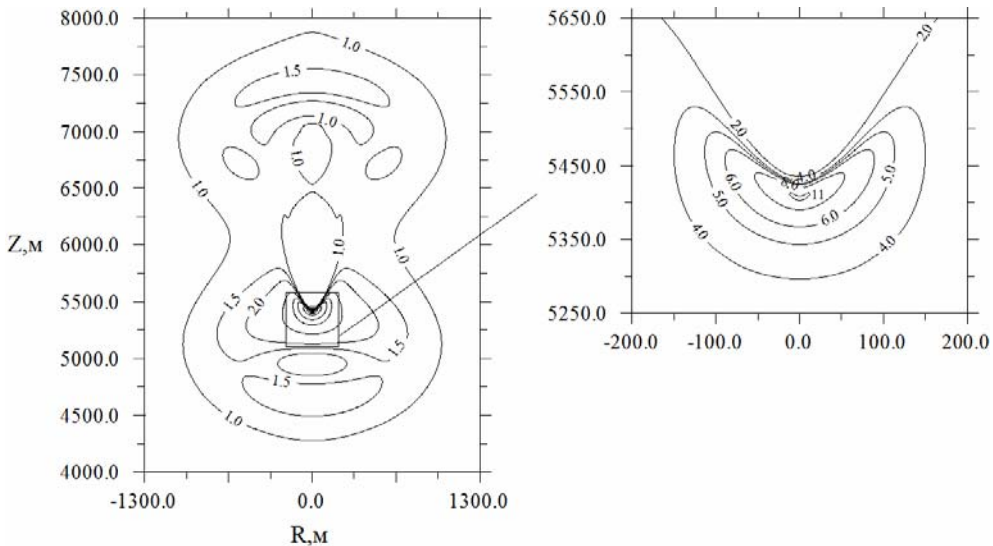


Рис. 3. Пространственное распределение перенапряжения в момент достижения пробойного значения  $l_{z,n} = l_{z,p} = 300 \text{ м}$ ,  $l_{r,n} = l_{r,p} = 500 \text{ м}$ ,  $Z_p = 5 \text{ км}$ ,  $Z_n = 7 \text{ км}$ ,  $k_{ch} = 2,17 \text{ Кл/с}$

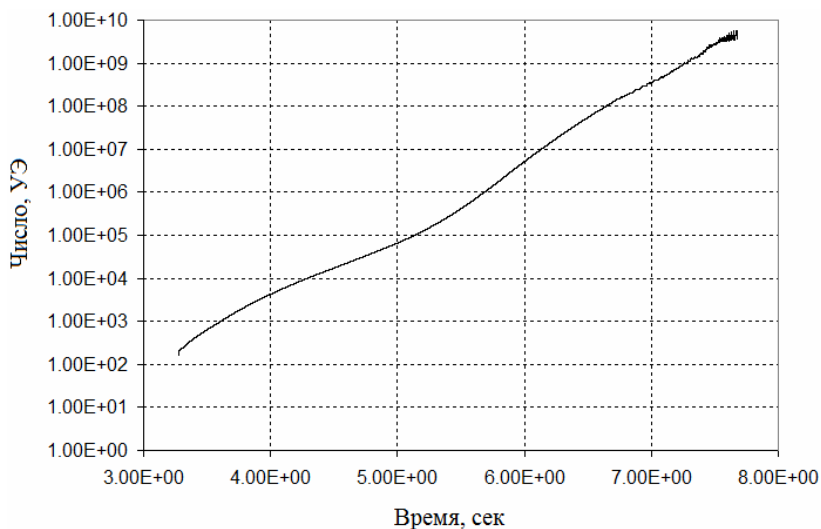


Рис. 4. Изменение суммарного числа уходящих электронов в разряде

## Заключение

В приближении сплошной среды построена двумерная модель атмосферного разряда в грозном электрическом поле с учетом кинетики релятивистских уходящих электронов, низкоэнергетичных электронов, положительных и отрицательных ионов. Выполнено численное моделирование процесса формирования в атмосфере проводящего канала, созданного в результате развития в электрическом поле лавин релятивистских уходящих электронов, инициируемых фоновым космическим излучением. Из результатов выполненных расчетов следует, что для реалистичных конфигураций грозного поля в результате развития разряда достигаются значения напряженности поля, при которых возможен старт лидера молнии. Рассмотренный механизм естественным образом позволяет объяснить наблюдаемый в ряде экспериментов усиление рентгеновского излучения в окрестности грозного облака непосредственно предшествующее вспышке молнии. Кроме того, в пользу данного сценария свидетельствует тот факт, что в момент старта молнии значения напряженности поля, измеряемые внутри облаков, находятся вблизи порога убегающих электронов в воздухе.

## Литература

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
2. Solomon R., Schroeder V., Baker M. B. Lightning initiation – Conventional and runaway-breakdown hypothesis // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2001. Vol. 127. P. 2683–2704.
3. Marshall T. C., Stolzenburg M., Thomas C. R. et al. Observed electric fields associated with lightning initiation // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32, doi:10.1029/2004GL021802.
4. Gurevich A. V., Milikh G. M., Valdivia J. A. Model of x-ray emission and fast preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. 1997. Vol. 231. P. 402–408.

5. Marshall T. C., McCarthy M. P., Rust W. D. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms // JGR. 1995. Vol. 100. P. 7097–7103.

6. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Ильяев Р. И., Куцык И. М., Руссель-Дюпре Р. А. Фундаментальные характеристики лавины релятивистских уходящих электронов в воздухе // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 7. С. 666–674.

7. McCarthy M., Parks G. K. Further observations of x-rays inside thunderstorms // Geophys. Res. Lett. 1985. Vol. 12, N 6. P. 393–396.

8. Gurevich A. V., Zybin K. P., Roussel-Dupre R. A. Lightning initiation by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers // Phys. Lett. A. 1999. Vol. 254. P. 79–87.

9. Бабич Л. П., Бочков Е. И., Куцык И. М. Численное моделирование проводящего канала, инициированного широким атмосферным ливнем в грозном электрическом поле // Геомагнетизм и аэронаука. 2009. Т. 49, № 2. С. 247–253.

10. Dwyer J. R. The initiation of lightning by runaway air breakdown // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32, doi:10.1029/2005GL023975.

11. Dwyer J. R. A fundamental limit on electric fields in air // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30, doi:10.1029/2003GL017781.

12. Бабич Л. П., Бочков Е. И., Куцык И. М. Источник уходящих электронов в поле грозного облака, обусловленный космическим излучением // Геомагнетизм и аэронаука. 2007. Т. 47, № 1. С. 709–713.

13. Александров Н. Л., Высоцкий Ф. И., Исламов Р. Ш. и др. Расчетная модель разряда в смеси  $N_2:O_2 = 4:1$  // ТВТ. 1981. Т. 19. С. 485–490.

14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.

15. Голубев А. И., Ивановский А. В., Соловьев А. А., Терехин В. А., Шморин И. Т. Одномерная модель для описания быстрых волн пробоя в длинных разрядных трубках // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1985. Вып. 2. С. 17–27.

16. Юман М. Молния. М.: Мир, 1972.

В настоящей работе описан алгоритм по моделированию поликристаллических веществ в комплексе МД (Молекулярная Динамика), являющийся развитием программы МДП [1], а также представлены результаты численных расчетов пробития и прохождения ударной волны в моно- и поли- кристаллах.

**Внутреннее строение кристаллических веществ**

Для описания внутреннего строения кристаллов используется понятие *кристаллическая решетка* – пространственная сетка, в узлах которой расположены частицы (атомы, ионы или молекулы) [2]. Кристаллическая решетка является математической абстракцией. В основе кристаллической решетки лежит элементарная ячейка, представляющая собой параллелепипед, простым перемещением которого в трех направлениях (вдоль трансляций) может быть построена пространственная кристаллическая решетка. Длины ребер параллелепипеда  $a, b, c$  и значения углов между его гранями  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  (рис. 1) характеризуют кристаллическую решетку кристалла.

В зависимости от величины и взаимной ориентации ребер элементарной ячейки возможно существование 14 типов кристаллических решеток (решетки Бравэ).

Наиболее типичные и реализованные в комплексе МД являются объемно-центрированные (ОЦК) и гранецентрированные кубические кристаллические решетки, гексагональная плотноупакованная (ГПУ) кристаллическая решетка (рис. 2). Для ОЦК и ГЦК  $a = b = c = a_0, \alpha_0 = \beta_0 = \gamma_0 = 90^\circ$ . ГПУ структура состоит из двух взаимопроникающих простых гексагональных решеток Бравэ ( $a = b = a_0, c = c_0, \alpha_0 = \beta_0 = 90^\circ, \gamma_0 = 120^\circ$ ), смещенных друг относительно друга следующим образом: по оси  $x$  – на  $a_0/2$ , по оси  $y$  – на  $a_0/3$ , по оси  $z$  – на  $c_0/2$ .

Расчеты по комплексу МД до недавнего времени в основном велись для веществ с идеальными кристаллическими решетками (монокристаллами). Однако в реальности инженеры имеют дело не с идеальными кристаллическими решетками, а с поликристаллическими конструкционными материалами. Поликристаллы представляют собой неидеальную упаковку частиц (рис. 3, 4), то есть произвольный набор случайно ориентированных монокристаллов. Каждое такое монокристаллическое зерно содержит в себе, по крайней мере, сотни частиц.

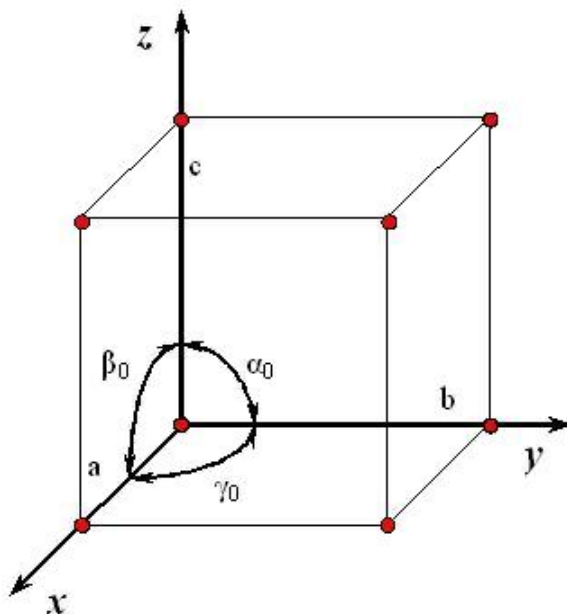


Рис. 1. Схематическое изображение кристаллической решетки



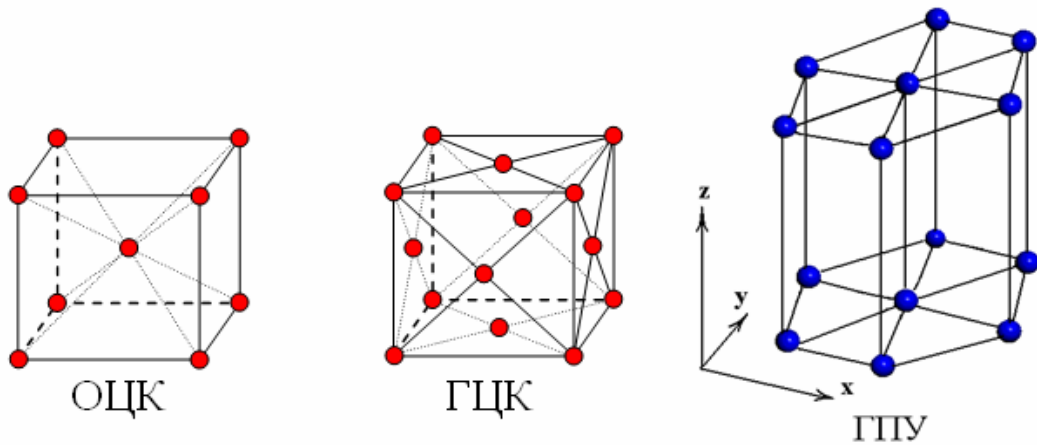


Рис. 2. Типы кристаллических решеток наиболее используемых в комплексе МД

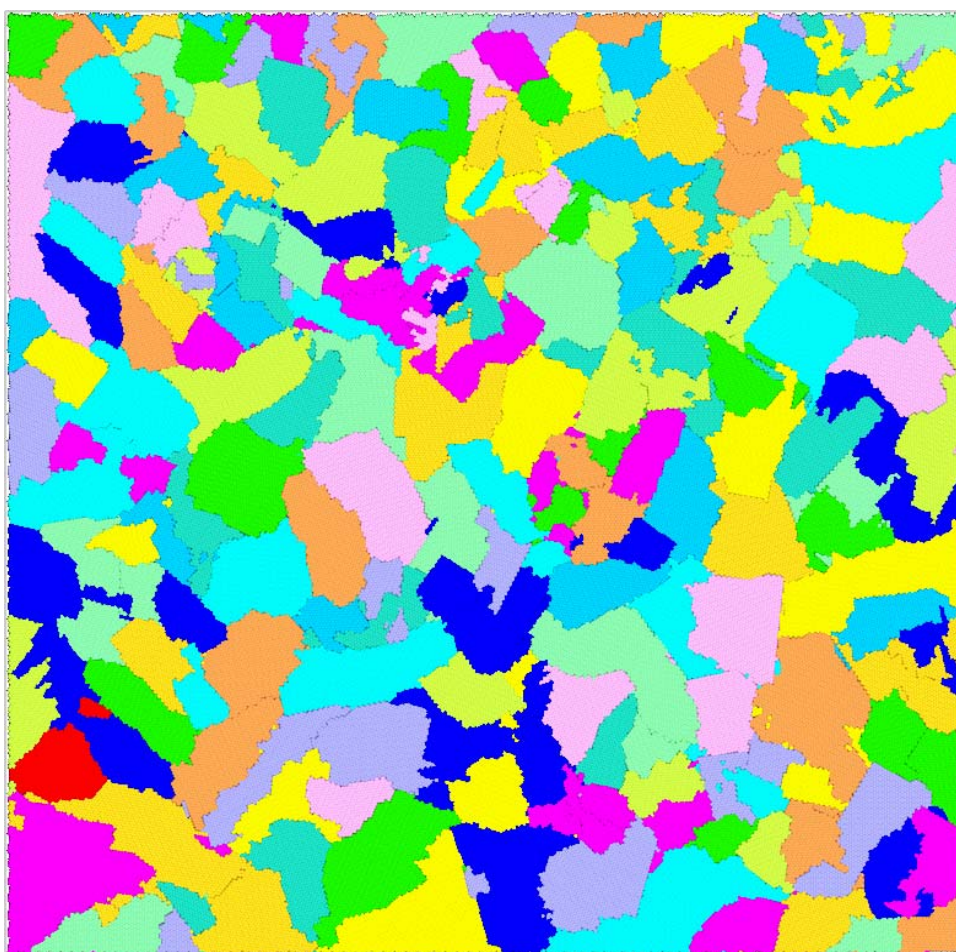


Рис. 3. Пример двухмерного поликристалла, каждому цвету соответствует отдельное монокристаллическое зерно

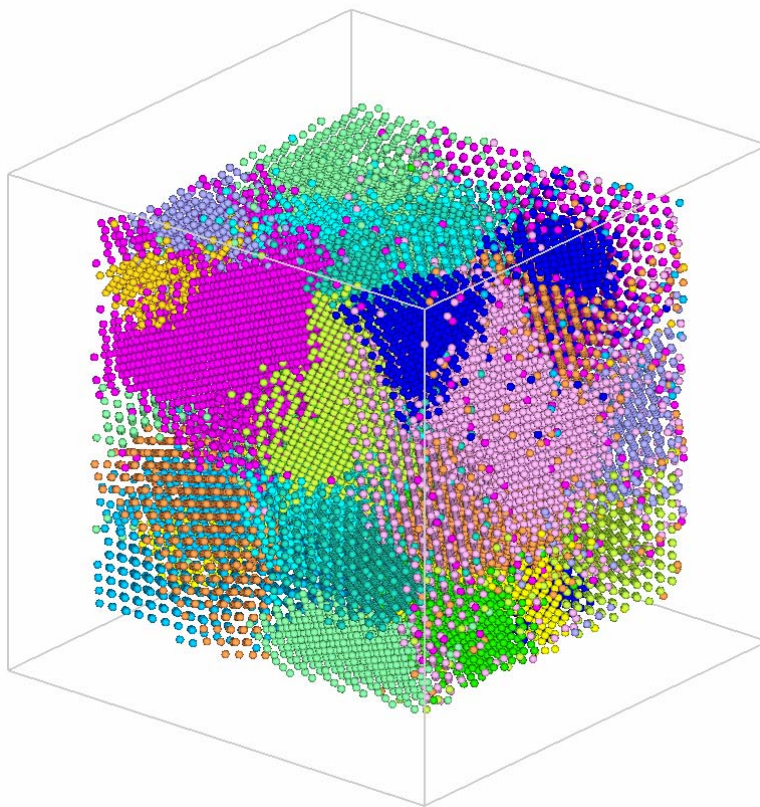


Рис. 4. Пример трехмерного поликристалла, каждому цвету соответствует отдельное монокристаллическое зерно

## Поликристаллические вещества и их построение

При моделировании макроскопического поведения твердых тел основная возникающая проблема, состоит в том, что регулярные упаковки частиц приводят к анизотропным моделям и свойствам материалов, которая заключается в том, что механические и физические характеристики в каждой точке тела являются функциями параметров направления. Подход в конструировании поликристаллических упаковок со случайным распределением ориентации монокристаллов позволяет решить эту проблему. Данный метод построения поликристаллов позволяет создать изотропные модели материалов, удовлетворяющих широкому спектру механических, термодинамических и физических свойств.

Существует много способов построения поликристаллических веществ: методом многогранников Вороного, методом последовательных релаксаций, метод роста монокристаллических зерен, метод свободной ячейки и т. д.

В комплексе МД имеется алгоритм построения поликристаллов методом многогранников Вороного. Суть этого метода в следующем: задается множество точек, являющихся центрами зерен, для которых строятся многогранники Вороного, где каждый многогранник рассматривается как монокристаллическое зерно. Далее происходит заполнение образованных зерен частицами идеальной кристаллической решетки,

которая повернута на произвольный угол. Многогранники Вороного – это выпуклые многогранники, по форме приближающиеся к сфере, но при этом имеющие разнообразную форму, объем и число граней. Зерна поликристаллов будут иметь всегда форму выпуклых многогранников в методе Вороного, в отличие от зерен, получаемых методом роста монокристаллических зерен, где монокристаллические зерна получают всевозможно различной формы и объема.

Для ускорения счета в комплексе МД используется сеточный подход и список связанных атомов. Размер ячейки сетки фиксированный и связан с радиусом обрезания потенциала. Для случая идеальной кристаллической решетки, каждая ячейка сетки заполняется частицами по отдельности. В параллельном режиме каждый процессор отвечает за свой набор ячеек, распределение ведется в соответствии с геометрической декомпозицией. Такой способ заполнения ячеек частицами используется и в методе многогранников Вороного, где добавляется проверка на попадание частицы в зерно. Но для построения поликристалла методом роста монокристаллических зерен было решено использовать другой подход к заполнению ячеек, потому что заполнение происходит нестандартно (случайным образом) и необходимо правильно сформировать список связанных частиц.

Таким образом, в комплексе МД был разработан и реализован алгоритм построения поликристалла методом роста монокристаллических зерен. Суть метода заключается в следующем:



1. в каждой из областей, где задается поликристаллическая структура, случайным образом задаются координаты центров зерен;

2. для каждого зерна выбирается произвольный угол поворота идеальной кристаллической решетки;

3. на каждой итерации выбирается произвольное зерно, для которого выбирается случайное направление роста, с учетом угла поворота, идеальной кристаллической решетки;

4. в направлении роста ставятся частицы, при этом для каждой частицы:

4.1. проверяется, попадает ли частица в область с поликристаллическим заполнением (в случае многообластной задачи):

4.1.1. если попадает, то определяется номер локальной ячейки по координатам частицы,

4.1.2. проверяется, нет ли рядом близко стоящих частиц, то есть расстояние, до которых меньше чем  $a_0/2$ . Для этого вычисляем расстояние до всех остальных частиц в ячейке, если расстояние получилось меньше  $a_0/2$ , то частицу не ставим. При этом также рассматриваются частицы из ближайших 8 или 26 соседних ячеек для двух- и трех- мерного случая соответственно,

4.1.3. если вышеперечисленные условия выполнены, то начинается формирование информации

о частице и ячейке: координаты частицы, тип частицы, количество частиц в ячейке, указатель на первую и последнюю частицу в ячейке, а так же формируется список связанных частиц;

5. итерации продолжаются до тех пор, пока не будет заполнена счетная область с поликристаллом.

Центры зерен поликристалла распределяются равномерно, так как датчик псевдослучайных чисел языка программирования Фортран имеет равномерное распределение. Также проводимые тесты показали, что распределение размеров зерен в поликристалле равномерное. Равномерное распределение показано на рис. 5.

### Результаты сравнения времени построения поликристаллических веществ методом Вороного и методом роста монокристаллических зерен

В кластере меди размером  $50 a_0 \times 50 a_0 \times 50 a_0$  задается 600 зерен, тип решетки ГЦК. Количество частиц в кластере  $\approx 450000$ . В таблице приводятся времена заполнения кластера.

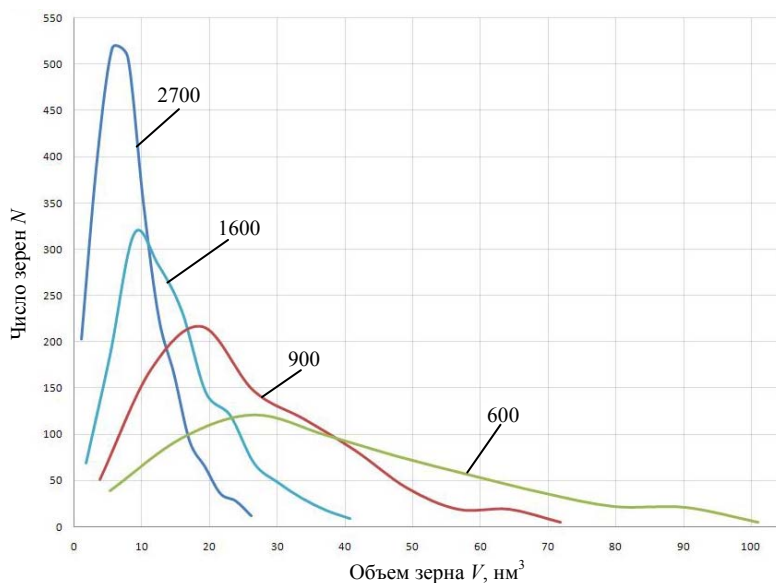


Рис. 5. Распределение размеров зерен в поликристаллическом образце размером  $50 a_0 \times 50 a_0 \times 50 a_0$

Таблица 1

Время заполнения поликристаллического образца методами Вороного и монокристаллическим ростом

Число процессоров	Время заполнения методом Вороного, с	Время заполнения методом роста монокристаллических зерен, с
1	200671,7	38,9
8	24510,7	84,8
16	13647,4	103,6
32	11072,3	144,1
64	6210,4	185,8
128	2586,9	171,2

Из приведенной таблицы видно, что время, требуемое на заполнение кластера меди методом роста монокристаллических зерен гораздо меньше чем методом Вороного.

### Двухмерные расчеты по прохождению ударной волны в моно- и поликристаллах с гексагональной упаковкой частиц

В образце меди (Cu), масса атома 63,546 АЕМ, с размерами  $400 \times 100$  элементарных ячеек,  $a_0 = 10 \text{ \AA}$ , используется потенциал Морзе с параметрами  $U_0 = 1,361 \text{ Эв}$ ,  $r_0 = 10 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 0,5233 \frac{1}{\text{А}}$ . Направление ударной волны показано на рис. 6.

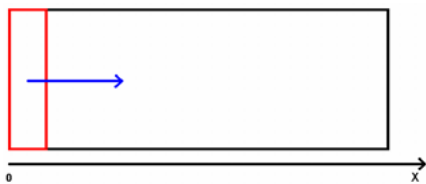


Рис. 6. Направление ударной волны

После этапа релаксации, запускается ударная волна. Двум слоям частиц навязывается скорость ударника 0,5 км/с. По направлению ОУ действуют

периодические граничные условия, по направлению ОХ свободная граница.

Из рис. 7 видно, что фронт ударной волны в монокристалле распространяется быстрее, а анализ результатов расчетов показал, что скорость ударной волны в поликристаллическом образце приблизительно на 20 % меньше, что свидетельствует о влиянии межзеренных границ на скорость распространения ударной волны.

### Моделирование высокоскоростного осколочного воздействия на многослойную преграду

Физическая картина моделирования пробивания преграды представлена на рис. 8, где  $V_0 = 4,2 \text{ км/с}$ .

Для задачи пробития двухслойной преграды в файле начальных данных комплекса МД задаются три трехмерные области: куб (из которого вырезается шар) и две пластины ( $40 \text{ см} \times 40 \text{ см}$ ). Размер частицы  $r_0 = 500 \text{ мкм}$ , для ударника упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки  $a_0 = 707,1 \text{ мкм}$ ), а для материалов преград – поликристалл, состоящий из ГЦК зерен ( $a_0 = 707,1 \text{ мкм}$ ). Линейный размер одного зерна был выбран  $\sim 3 \text{ мм}$ , и соответственно, в слое текстолита было задано 35000 зерен, а в слое алюминия 18000 зерен.

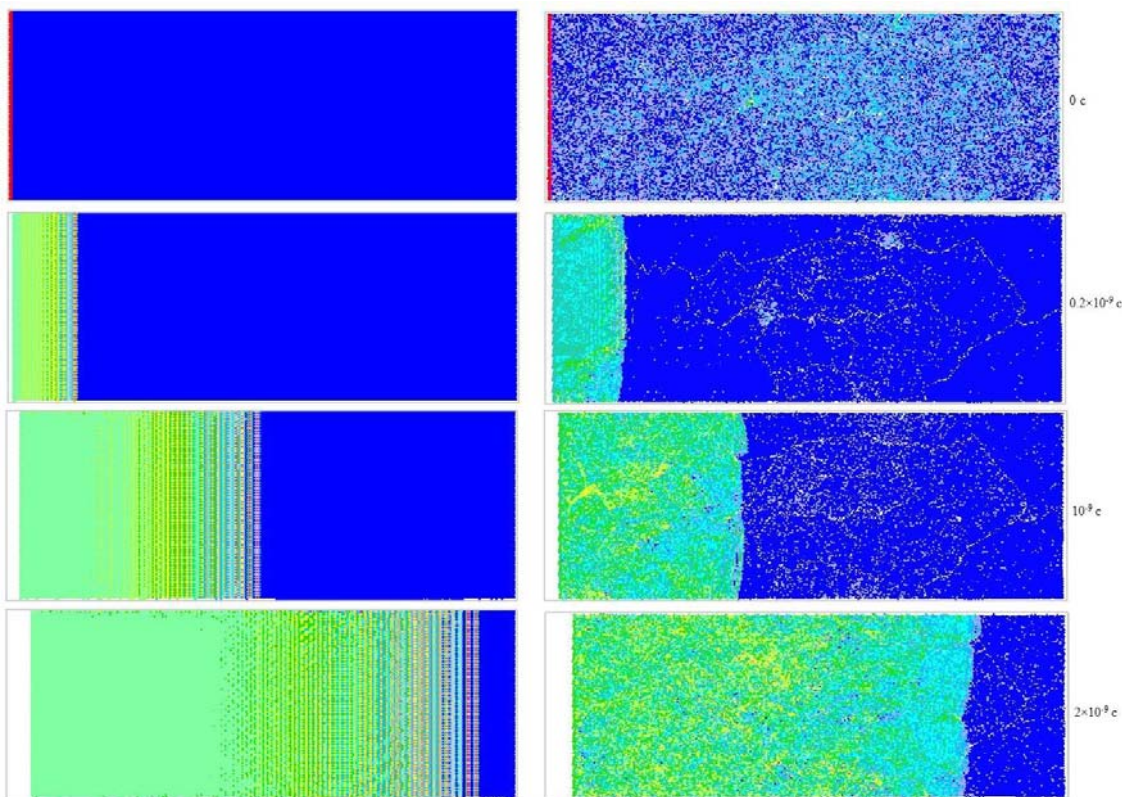


Рис. 7. Этапы прохождения ударной волны в поликристаллическом и монокристаллическом образцах

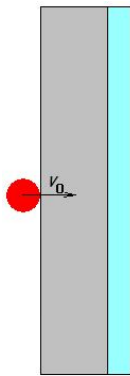


Рис. 8. Начальная геометрия задачи пробития

Результаты полей плотностей для задачи пробития преград с различными внутренними структурами представлены на рис. 9 и 10. На рис. 9 видна анизотропия материала, которая приводит к отверстию не круглой формы, как в эксперименте.

На основании полученных численных результатов задачи с высокоскоростным воздействием на многослойную преграду видно, что использование поликристалла позволило получить изотропную модель вещества, которое привело к более качественному определению формы и размера полученного отверстия и лучшему согласию с экспериментальными значениями.

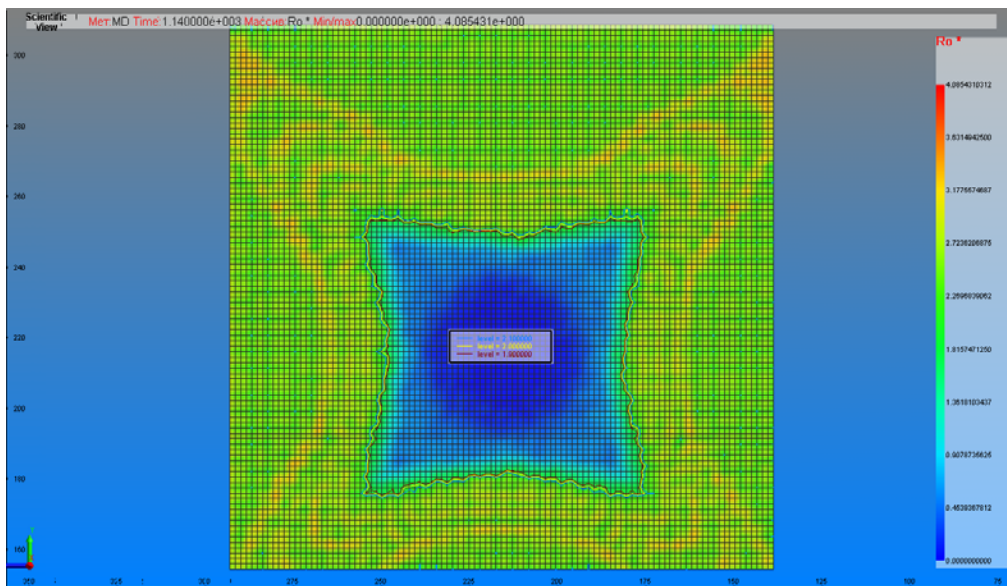


Рис. 9. Поле плотности в сечении плоскостью YZ алюминия с монокристаллическим заполнением, с изолиниями уровня плотности, на конечный момент времени

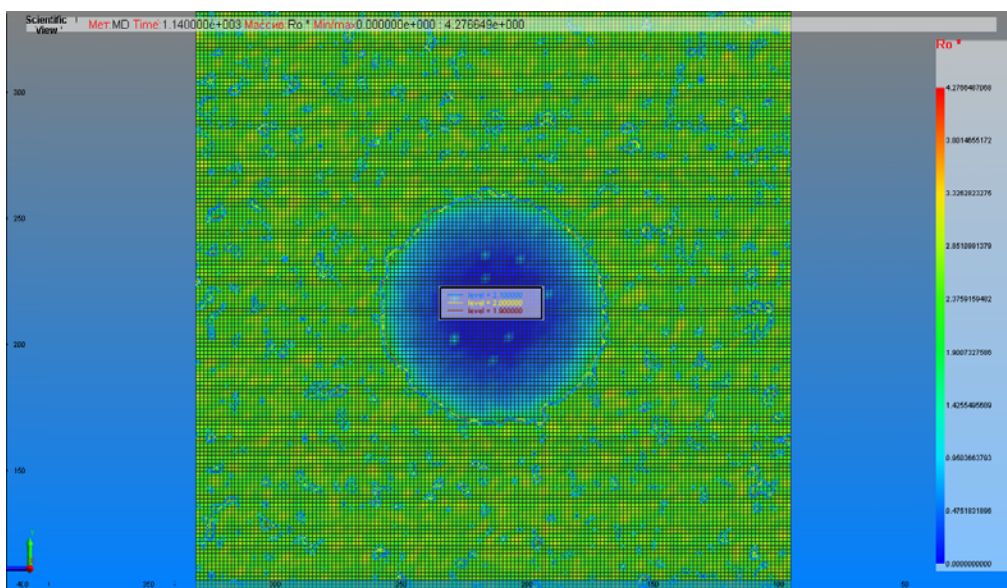


Рис. 10. Поле плотности в сечении плоскостью YZ алюминия с поликристаллическим заполнением, с изолиниями уровня плотности, на конечный момент времени

## Заключение

Процессы релаксации полученных структур проводились на гибридных вычислительных системах с применением арифметических ускорителей, что позволило значительно сократить длительность вычислений.

Задание начальных данных в виде поликристаллов позволяет моделировать изотропные материалы, которые дают качественное согласие с результатами экспериментов, исключая влияние анизотропии материала, являющейся следствием идеальной упаковки частиц.

Хотя и алгоритм плохо распараллеливается, но он позволяет заполнять область быстрее, чем имеющимся в комплексе МД с использованием ячеек Вороного.

Несомненной ценностью данного алгоритма является построение более реалистичной модели поликристалла, так как зерна в нем получаются самой разнообразной формы и объема.

## Литература

1. Барабанов Р. А., Бутнев О. И., Воронин Б. Л. и др. Программа МДП-СОВЦ решения задач молекулярной динамики на параллельных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 2001. Вып. 1. С. 1–16.
2. Кормилицын О. П., Шукейло Ю. А. Механика материалов и структур нано- и микротехники. М.: Академия, 2008.



# МЕТОДИКА Д. ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА ДВУМЕРНЫХ ЛАГРАНЖЕВЫХ КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦ

П. В. Егоров, Д. М. Линник

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Двумерная методика Д [1] уже на протяжении многих лет успешно используется для решения широкого класса задач, связанных с отработкой и моделированием физических процессов, протекающих при работе различных специзделий, разрабатываемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Отличительными особенностями методики является использование регулярных четырехугольных сеток с применением лагранжевого подхода к описанию газодинамических течений, а также наличие мощного аппарата по моделированию контактных взаимодействий между различными веществами. Алгоритмы расчета контактных границ, разработанные для двумерного случая [2], позволяют рассчитывать на регулярных сетках достаточно сложные течения в областях совершенно произвольной формы с сохранением лагранжевых границ между веществами. В основном это достигается за счет разбиения исходной геометрии на более мелкие фрагменты (математические области) и заданием каждой из них соответствующих граничных условий.

С одной стороны подобный подход действительно позволяет производить расчет практически любой геометрии, какой бы сложной она не была. С другой стороны, приходится платить за это существенным усложнением как самих счетных алгоритмов (что приводит к определенным трудностям при их программной реализации уже в двумерном случае), так и процесса подготовки задачи к счету.

Поэтому для повышения технологичности расчетов проводимых по методике Д требуется пересмотреть существующий подход к расчету контактных взаимодействий. Данный подход характеризуется тем, что базовым его элементом являются не отдельно взятые «контактные» узлы, а участки контактных границ (КГ) представляющие собой упорядоченные совокупности граничных точек отдельно взятой математической области. В результате для корректного счета контактных взаимодействий требуется задание значительного объема дополнительной информации о границах математических областей (типы контактных границ, их соприкосновение, стыковка различных участков КГ, порядок их обхода и т. д.). Вследствие такого подхода, немаловажную роль при подготовке и проведении сложных расчетов начинает играть «человеческий фактор», то есть опыт и квалификация исполнителя. Еще одним существенным недостатком существующего подхода является то, что он жестко ориентирован на исполь-

зование регулярных четырехугольных сеток (как следствие математическая область обязана представлять собой топологический четырехугольник), в результате чего значительно усложняется процесс усовершенствования счетных возможностей методики (например, введение нерегулярных сеток [3]). В данной работе предлагается подход по моделированию контактных взаимодействий лишенный вышеуказанных недостатков.

Стоит отметить, что вывод уравнений движения контактной границы основывался на идее, согласно которой узлы на контактной границе движутся под действием собственных (внутренних) и внешних сил. Похожие идеи заложены в основу алгоритма расчета контактных взаимодействий по методу неупругого удара в методике ДМК [4]. Кроме того для локализации геометрических объектов в пространстве использовался известный алгоритм линейного позиционирования.

## Основные понятия и общая схема алгоритма

Целью контактных алгоритмов является расчет скоростей в точках на некоторых участках внешних границ, которые называются *контактными границами*, и через которые осуществляется взаимодействие *математических областей*. Под математической областью мы будем понимать произвольную область, заполненную связанной счетной сеткой. Непрерывную последовательность узлов сетки на участке внешней границы, объявленной как контактная граница, будем называть *контактным участком*. Каждая точка контактного участка называется *контактным узлом*, а каждый интервал между двумя соседними контактными узлами – *контактным сегментом*.

Взаимодействие математических областей происходит вследствие взаимодействия их контактных узлов. Каждый узел воздействует на парную границу через смежные с ним *полусегменты*. Под полусегментом контактного узла будем понимать участок смежного с ним контактного сегмента, прилежащий к рассматриваемому узлу. Каждый полусегмент контактного узла характеризуется *парным контактными сегментом*, *координатой положения* в парном сегменте и *статусом контакта* с ним. Статус контакта характеризует взаимодействие контактного узла и парного сегмента и может динамически изменяться на каждом временном шаге. Он может принимать значения, которые характеризуют вакуумный, контактирующий, отскочивший или ударивший узел.

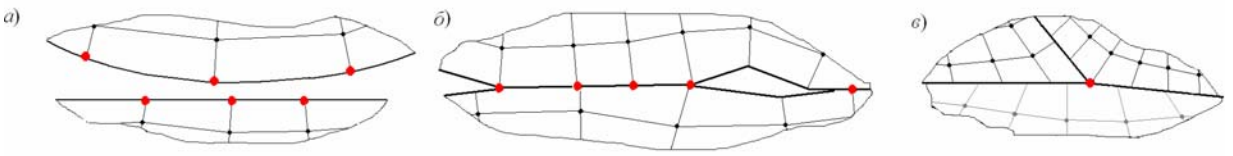


Рис. 1. Типы контактных узлов

С точки зрения типа контакта все контактные узлы в алгоритме можно разделить на 3 группы (рис. 1): вакуумные (а), контактирующие (б) и точки стыка (в).

Общая схема расчета контактных взаимодействий представлена последовательностью следующих шагов:

1) Сглаживание на контактной границе. Рассчитываются добавки к скоростям от сглаживания, и происходит корректировка начальных скоростей  $u_{n-1/2}$  с учетом этих добавок.

2) Расчет взаимного влияния контактных границ. Для каждого контактного сегмента составляется список полусегментов парной границы, которые перекрываются с ним. А также определяется величина этого перекрытия.

3) Алгоритм движения контактной границы. На этом этапе выполняется расчет скоростей  $u_{n+1/2}$  контактных узлов на  $(n + 1/2)$  момент времени. В данном этапе можно выделить 2 шага. На первом шаге выполняется расчет скоростей, исходя из уравнения движения. На втором шаге, который можно опционально включать или отключать, происходит импульсное сглаживание, которое заключается во взаимном обмене импульсами между контактными границами.

4) Алгоритм отскока. На этом этапе выполняется анализ возникновения отрицательных контактных давлений. Узлы, для которых зафиксирован отскок, помечаются, как отскачившие. На следующем временном шаге эти узлы становятся вакуумными.

5) Аппроксимация границы. Для контактных узлов рассчитывается их обновленное положение  $x_{n+1}$  на  $(n + 1)$  момент времени. Затем по обновленным координатам строится новая аппроксимация линии контактной границы на каждом контактном сегменте.

6) Обновление параметров контакта (парный сегмент, координата в нем и статус контакта). Парный сегмент и координата в нем определяются по обновленной геометрии контактных границ, а статус контакта корректируется в процессе анализа их относительного скольжения (если такое скольжение разрешено).

7) Алгоритм удара. На этом этапе выполняется анализ перелета вакуумных узлов через парную границу. При возникновении таких перелетов происходит пересчет скоростей в задетых ударом узлах, а также локальное обновление геометрии границы. Алгоритм удара является 2-х шаговым – с разделением движения затронутых узлов до и после удара.

8) Алгоритм посадки. Данный алгоритм является стандартным этапом для многих методик расчета контакта и позволяет сохранить неразрывность по координатам на контактной границе. Данную неразрывность можно обеспечить либо через посадку по скоростям, либо через посадку по координатам. В разработанной методике расчета реализована возможность использования обоих способов.

### Алгоритм движения контактной границы

Рассмотрим алгоритм движения контактной границы на примере контактного узла (i) (рис. 2).

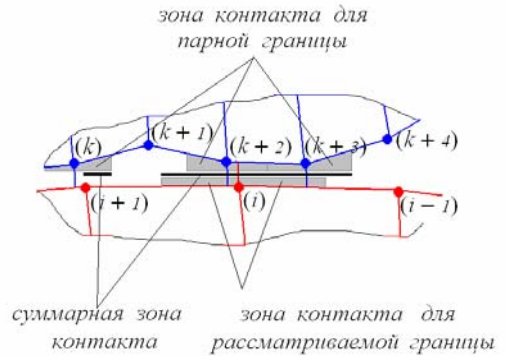


Рис. 2. Построение зоны контакта

На рисунке представлены участки рассматриваемой (узлы  $(i - 1)$ ,  $(i)$  и  $(i + 1)$ ) и парной (узлы  $(k)$ ,  $(k + 1)$ ,  $(k + 2)$ ,  $(k + 3)$ ,  $(k + 4)$ ) границ. Для большей наглядности рассматриваемая и парная границы показаны разнесенными, а факт нахождения в контакте для узлов обеих границ выражен с помощью линий, проведенных от одной границы к противоположной. Так, из рисунка видно, что узел  $(i)$  рассматриваемой границы, а также узлы  $(k)$ ,  $(k + 2)$ ,  $(k + 3)$  находятся в контакте. В противоположность им  $(i + 1)$ ,  $(i - 1)$  узлы рассматриваемой границы и  $(k + 1)$ ,  $(k + 4)$  узлы парной границы являются вакуумными.

Суть алгоритма заключается в том, что если какой-либо узел находится в контакте с парной границей, то в контакте находятся участки обеих границ, соответствующие полусегментам рассматриваемого контактного узла. Суммарная же область контакта, определяющая участок границ на котором осуществляется взаимная передача сил инерции и давления, получается в результате их объединения. Для контактного узла  $(i)$  эта зона должна быть ограничена его смежными контактными сег-

ментами. Рассмотрим уравнение движения ( $i$ )-го контактного узла:

$$-M_{\text{собст}}^i \bar{a}_i + \bar{F}_{\text{собст}}^i + \bar{F}_{\text{внешн}} = \bar{0}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{собст}}^i$  и  $\bar{F}_{\text{собст}}^i$  – собственная масса и вектор силы, вычисленные в узле;  $\bar{F}_{\text{внешн}}$  – вектор внешних нормальных сил, который можно расписать, как

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\text{внешн}}^i = & -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N M_{\text{собств}}^k (\bar{a}_k \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k} + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{F}_{\text{собств}}^k \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N$  – количество полусегментов парной границы, которые перекрываются со смежными сегментами узла;  $M_{\text{собств}}^k$  и  $\bar{F}_{\text{собств}}^k$  – собственные узловые параметры узла парной границы;  $\bar{a}_k$  – вектор ускорения узла парной границы;  $\bar{n}_k$  – вектор, задающий нормаль по отношению к линии контакта;  $L_k$  – величина перекрытия полусегментов рассматриваемой и парной;  $S_k$  – площадь узла парной границы, равная полусумме длин смежных сегментов.

Из рассмотрения формул (1)–(2) видно, что полученная система уравнения является неявной. С целью сделать полученную систему уравнений явно разрешимой относительно компонент вектора ускорения  $\bar{a}_i$  сделаем допущение, что в окрестности ( $i$ )-го узла ускорения узлов парной границы несильно отличаются от ускорения в рассматриваемом узле, в этом случае формулы (7) и (9) переписываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\text{внешн}}^i = & -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N M_{\text{собств}}^k (\bar{a}_i \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k} + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{F}_{\text{собств}}^k \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k}. \end{aligned} \quad (3)$$

Особенностью расчета вакуумных узлов является то, что для них суммарная зона контакта, является ограниченной смежными полусегментами, а не сегментами, как это делается для контактирующих узлов.

По рассчитанным узловым ускорениям происходит определение компонент вектора скорости:

$$\bar{u}^{n+1/2} = \bar{u}^{n-1/2} + \bar{a}^{n+1/2} \tau^{n+1/2}. \quad (4)$$

### Алгоритм удара

В алгоритме реализован симметричный, итерационный, 2-х шаговый алгоритм удара. При этом под симметричностью алгоритма понимается его независимость относительно рассмотрения границы: любой контактный узел, вне зависимости от того,

какой границе он принадлежит, при перелете через парную границу становится ударным узлом. Под итерационностью алгоритма понимается тот факт, что все перелетевшие парную границу контактные узлы вводятся в контакт в порядке минимального времени их подлета к парной границе. После каждого акта удара, происходит пересчет скоростей и перестроение геометрии контактных границ, что приводит и к корректировке набора изначально перелетевших узлов. Алгоритм удара выполняется итерационно до тех пор, пока остаются вакуумные узлы, которые перелетают парную границу. Общая схема удара следующая:

1) Среди вакуумных контактных узлов ищутся узлы, перелетевшие линию парной границы. Для каждого такого узла вычисляется время подлета до границы по следующей формуле:

$$\tau = \tau^{n+1} - \frac{(\bar{p}_0 - \bar{p}) \bar{n}}{(\bar{u}_0 - \bar{u}) \bar{n}}, \quad (5)$$

где  $\bar{p}_0$  – координаты рассматриваемого узла на ( $n+1$ ) момент времени;  $\bar{u}_0$  – вектор скорости рассматриваемого узла на ( $n+1/2$ ) момент времени;  $\bar{p}$  – координаты проекции рассматриваемого узла на контактный сегмент парной границы;  $\bar{u}$  – скорость парной границы в точке проекции на нее рассматриваемого узла;  $\bar{n}$  – нормаль к парной границе в точке проекции на нее рассматриваемого узла.

Если перелетевших узлов нет, то алгоритм удара на данном временном шаге завершается.

2) Среди перелетевших узлов ищутся контактные узлы с минимальным временем подлета. Эти узлы помечаются, как ударившие. Минимальное время подлета обозначаем через  $\tau_{\text{min}}$ . Пересчет скоростей выполняется для ударивших узлов, а также для тех узлов, полусегменты которых перекрылись с полусегментами ударивших узлов.

3) Выполняется пересчет скоростей для узлов, затронутых ударом:

$$-M_{\text{собст}}^i \bar{v}_i + \bar{J}_{\text{собст}}^i + \Delta \bar{J}_{\text{внешн}}^i = 0, \quad (6)$$

где  $\bar{v}_i$  – величина скорости узла после удара;  $\bar{J}_{\text{собст}}^i = M_{\text{собст}}^i \bar{u}_i$  – исходный импульс рассматриваемого узла;  $\Delta \bar{J}_{\text{внешн}}^i$  – изменение нормального импульса парной границы, равное:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{J}_{\text{внешн}}^i = & -\sum_{k=1}^N M_{\text{собств}}^k (\bar{v}_i \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k} + \\ & + \sum_{k=1}^N M_{\text{собств}}^k (\bar{u}_k \bar{n}_k) \bar{n}_k \frac{L_k}{S_k}. \end{aligned} \quad (7)$$

Суммарная зона контакта для всех узлов ограничивается смежными полусегментами.

4) Пересчитываются конечные координаты для затронутых ударом узлов:



$$\bar{x}^{n+1} = \bar{x}^n + \bar{u}_1^{n+1/2} \tau_{min} + \bar{u}_2^{n+1/2} (\tau^{n+1} - \tau_{min}), \quad (8)$$

где  $\bar{u}_1^{n+1/2}$  – скорость узла, полученная после алгоритма движения контактной границы;  $\bar{u}_2^{n+1/2}$  – скорость узла, полученная после алгоритма удара.

5) Выполняется обновление аппроксимации геометрии границ тех контактных сегментов, которые оказались затронутыми ударом.

6) Все ударившие узлы становятся контактными, выполняется переход на пункт 1.

## Обновление параметров контакта

Важной составляющей алгоритма является возможность автоматического определения контакта между взаимодействующими математическими областями. Данная возможность реализована с помощью т.н. габаритной решетки, под которой условимся понимать обычную прямоугольную равномерную сетку, которая существует только в рамках программы. Она накладывается на всю расчетную схему, и используется с целью локализации тех или иных объектов. В рамках программы автоматического расчета контакта такими объектами являются контактные сегменты парной границы. Рассмотрим основные этапы алгоритма автоматического определения контакта:

1) *Инициализация габаритной решетки.* Данный этап выполняется до начала счета с целью определения количества разбиений габаритной решетки по оси  $X$  и  $Y$ . Данное количество разбиений остается неизменным на протяжении всего времени работы программы и определяется, исходя из предположения, что характерный размер одной ячейки габаритной решетки должен быть равен средней длине всех контактных сегментов, которые есть в схеме.

2) *Заполнение габаритной решетки.* Данный этап происходит на каждом временном шаге. Он начинается с корректировки минимальных и максимальных значений абсцисс и ординат, определяющих общий размер решетки. Затем выполняется обход всех контактных сегментов, в ходе которого выполняется анализ, через какие ячейки габаритной решетки проходит прямолинейный отрезок, соответствующий каждому сегменту. В процессе этого анализа для каждой ячейки габаритной решетки составляется список контактных сегментов, которые проходят через данную ячейку.

3) *Анализ окрестности узла.* Для того чтобы обновить параметры контакта (парный сегмент и положение в нем) для конкретного контактного узла, необходимо получить информацию обо всех контактных сегментах, находящихся в его окрестности. Под окрестностью узла будем понимать блок

ячеек габаритной решетки размером  $3 \times 3$ , построенный около центральной ячейки, которой принадлежит рассматриваемый контактный узел (рис. 3).

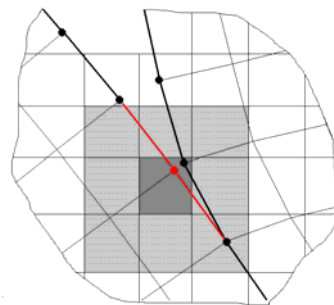


Рис. 3. Пример поиска сегментов из окрестности узла

4) *Поиск парного сегмента* выполняется среди контактных сегментов из окрестности рассматриваемого узла. При этом ищется такой сегмент, в который попадает его проекция. Если таких сегментов несколько, то выполняется анализ, какой из сегментов более подходит.

## Примеры расчетов

*Автомодельная сходящаяся ударная волна.* В качестве теста используется известная задача о схождении сферической автомодельной ударной волны и последующем отражении ее от центра [5], для которой существует аналитическое решение. Целью данного расчета является проверка точности счета с сохранением сферической симметрии на сетках сферического типа, а также гладкость получаемого решения при переходе через контактную границу.

Постановка задачи взята из. Начальная расчетная область представляет собой полукруг радиусом  $R_0 = 1$  см с центром в начале координат, заполненный идеальным газом с показателем адиабаты  $\gamma = 5/3$  с плотностью 1. Внешняя граница является свободной поверхностью с заданной на ней давлением в виде функции от. Расчетная область разделена на две математические области контактной границей, которая представляет собой окружность с радиусом 0,5 см и центром в начале координат.

Задача рассчитывалась в области  $0^\circ < \varphi < 180^\circ$ . Расчетная сетка выбиралась равномерной по углу и по радиусу. Для обеих областей количество точек по радиусу выбиралось равным 25. Число разбиений по углу для внутренней области равнялось 40, для внешней – 70.

Сферическая симметрия численного решения по давлению составила 11 знаков после запятой. На рис. 4–5 приводятся профили плотности в зависимости от радиуса на два контрольных момента времени ( $t = 5$  мкс и  $t = 7,8$  мкс).

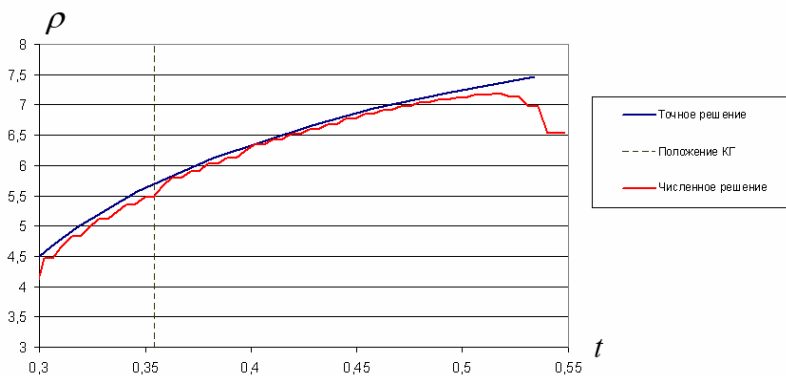


Рис. 4. Профиль плотности на момент времени 5 мкс

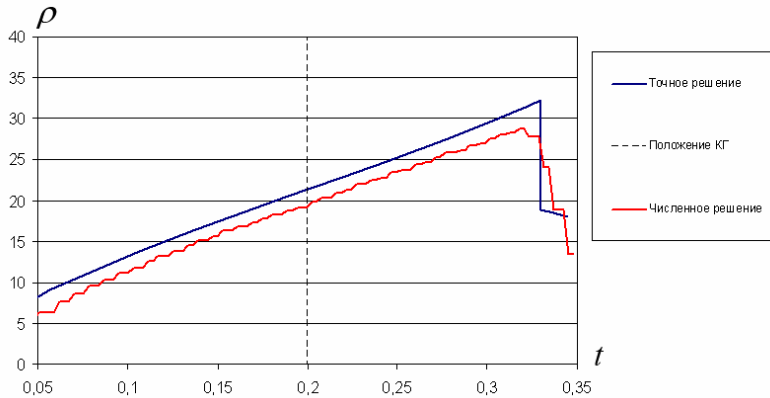


Рис. 5. Профиль плотности на момент времени 7,8 мкс

**Задача Хворостина (сборка).** С целью тестирования разработанного алгоритма расчета контактных границ для случая произвольной геометрии была решена задача Хворостина. Начальная геометрия задачи представлена на рис. 6.

В процессе моделирования стальной цельнометаллический ударник (области 1–12) ударяется со скоростью 34 м/с в передний лист металлического корпуса, который также выполнен из стали. Корпус представляет собой сборную конструкцию, состоящую из массивного цельнометаллического основания (об-

ласти 15, 16 и 17), переднего металлического листа (область 13) и слоя ВВ (область 14). Задача считалась без кинетики, с газодинамикой и упругостью. Тонкий слой фторопласта, который отделяет ВВ от металлических деталей корпуса, при расчете не учитывался и был заменен на взрывчатое вещество. В качестве контрольной величины при расчете брался дисбаланс полной энергии системы.

На рис. 7 приведено распределение поля давлений, полученное на момент окончания счета (600 мкс).

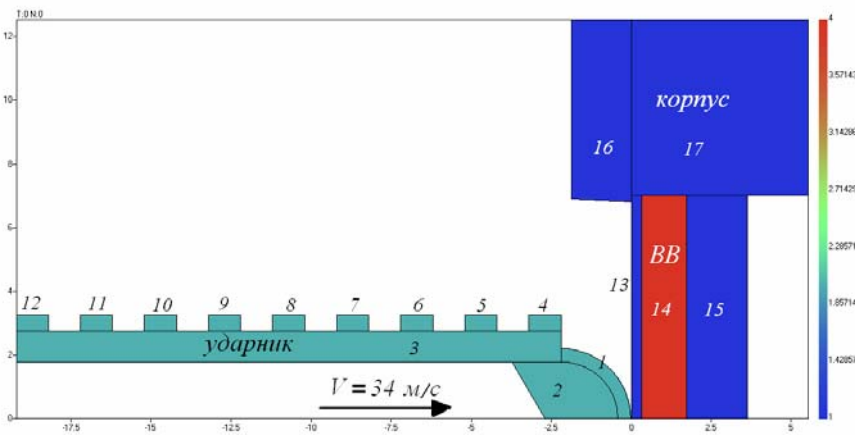


Рис. 6. Задача Хворостина. Начальная геометрия

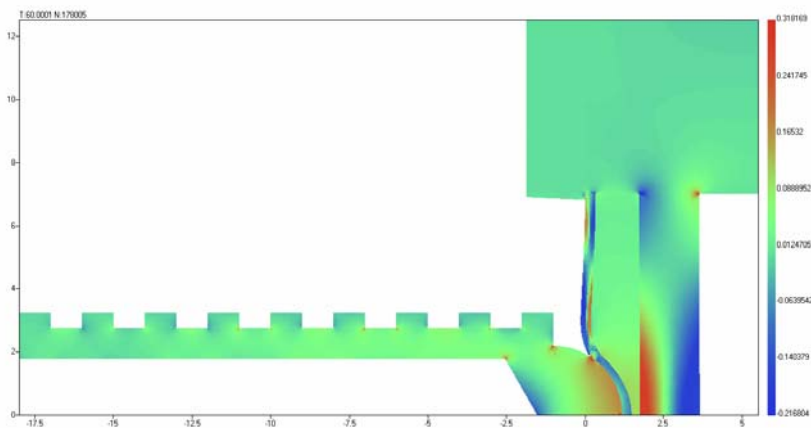


Рис. 7. Распределение поля давлений

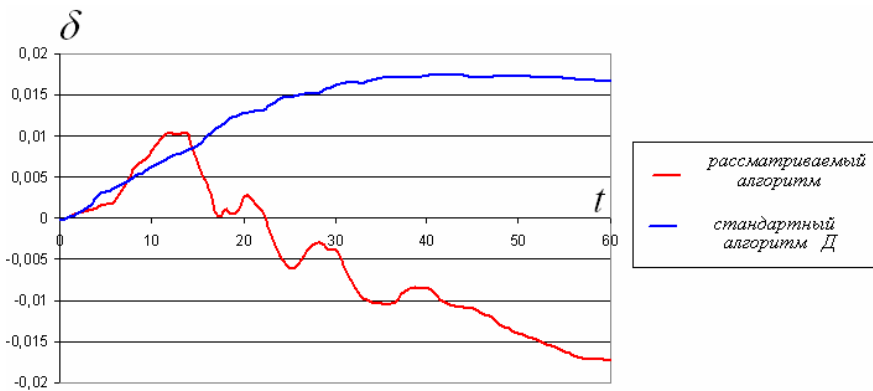


Рис. 8. Дисбаланс полной энергии системы

График зависимости дисбаланса полной энергии системы от времени  $\delta(t) = \frac{E_0 - E}{E_0}$ , а также сравнение с результатом, полученным по стандартным алгоритмам методики Д, показано на рис. 8. Видно, что предельное отклонение полной энергии системы от ее первоначального значения не превышает 2 %.

### Заключение

В результате проделанной работы был разработан и реализован алгоритм расчета контактных взаимодействий для случая произвольной геометрии. Отличительной особенностью данного алгоритма является его гибкость по отношению к расчетной сетке, то есть возможность расчета как на структурированной, так и на нерегулярной сетках. Кроме того, значительно сокращен объем дополнительной информации о границах математических областей требуемой для корректного счета контактных взаимодействий, что значительно снижает риск появления ошибок в расчёте вследствие «человеческого фактора».

Проведенные тестовые расчеты продемонстрировали работоспособность алгоритмов и приемлемое совпадение с результатами, полученными при использовании старого подхода к моделированию контактных взаимодействий.

### Литература

1. Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриева Л. В., Артемьев А. Ю., Будников В. И., Вершинин В. Б., Дмитриев Н. А., Корепова Н. В., Линник Д. М., Машиновская Е. В., Муругова О. О., Садчиков В. В., Самигулина Р. З., Сулова С. Ю., Хитева Е. С., Чернышев Ю. Д. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.
2. Реализация в комплексе МИД методики расчета двумерных контактных границ. Отчет о НИР/ВНИИЭФ; Ю. Д. Чернышев, Е. Е. Чупраков; инв. № 8/19884 дсп. Саров, 2007.
3. Методика Д. Алгоритмы расчета двумерных задач газовой динамики на неструктурированных лагранжевых сетках (Часть 1). Отчет о НИР/ВНИИЭФ; П. В. Егоров, Д. М. Линник; инв. № 8/21440 дсп. Саров, 2007.
4. Программа расчета движения «вакуумных» контактных границ в рамках комплекса ДМК-2005. Отчет о НИР/ВНИИЭФ; Ялозо А. В.; инв. № 8/19928 дсп. Саров, 2007.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981.

# ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ВЕРСИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕЕК РЕАКТОРОВ CONCORD

*С. С. Касаткин, А. Н. Гребенников, С. В. Мжачих, А. В. Алексеев, Н. А. Крутько, Е. А. Гусев,  
А. В. Бнятов, В. В. Евдокимов, А. Н. Москвин, М. П. Пенелеев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

С 2008 года в ИТМФ существенно возрос объем работ по решению задач в интересах гражданских отраслей. Одно из развивающихся направлений – создание комплексов программ для высокоточного моделирования на суперЭВМ основных теплогидравлических и нейтронно-физических процессов, протекающих в ядерных энергетических установках различного типа. К этому моменту в ИТМФ уже создан целый ряд отдельных пакетов программ, предназначенных для моделирования этих процессов. Один из них – комплекс программ SERENA (ранее часть этого комплекса носила название КОПАТ [0]). Его основное назначение – проведение на суперЭВМ связанных нейтронно-физических расчетов реакторных установок (РУ) в реальной трехмерной геометрии.

Одним из способов получения нейтронных данных, описывающих состояние ячеек активной зоны РУ, является расчет однородных малогрупповых нейтронных констант для ячейки или какой-либо ее части. Данная процедура выполняется в комплексе CONCORD.

## Комплекс программ расчета нейтронно-физических характеристик ячеек реактора CONCORD

Комплекс программ CONCORD является ключевым звеном в технологии константного обеспечения 3D-динамических нейтронно-физических расчетов реакторных установок, принятой в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Он предназначен для расчетов нейтронно-физических характеристик ячеек активной зоны реакторов с учетом выгорания топлива и теплового расширения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). С использованием данного комплекса проводятся расчеты кампаний выгорания топливных элементов, или ТВС (тепловыделяющих сборок), а также осуществляется подготовка наборов однородных (произвольное число однородных областей в пределах ячейки) малогрупповых констант, описывающих состояния ячеек активной зоны и ее отражателей в различные моменты времени, соответствующие различным значениям глубины выгорания, для некоторого набора теплогидравлических состояний. Комплекс включает в себя:

1) блок расчета многогрупповых макроконстант для отдельных областей ячеек с учетом теплового движения ядер, химических связей атомов в веществе, резонансной экранировки сечений;

2) блок расчета нейтронно-физических характеристик ячеек в многогрупповом кинетическом приближении с учетом анизотропии рассеяния для одномерной сферической и цилиндрической геометрий;

3) блок расчета нейтронно-физических характеристик в двумерной геометрии на произвольных регулярных и нерегулярных сетках в многогрупповом анизотропном приближении с использованием Sn-метода;

4) блок расчета кинетики выгорания ядер делящихся материалов с учетом наработки выделенных осколков деления, их выгорания в нейтронных потоках и процессов радиоактивных распадов;

5) блок свертки многогрупповых нейтронных констант в малогрупповые макроконстанты с учетом нейтронных спектров в различных областях ячейки и блок гомогенизации констант в пределах определенных однородных зон ячейки (или всей ячейки).

Структура комплекса программ CONCORD для расчета характеристик ячеек тепловых РУ с учетом выгорания топлива представлена на рис. 1. Блоки комплекса, соответствующие одной сущности с точки зрения данных и назначения, выделены одинаковыми цветами.

Расчет кампании ячеек реактора и расчет малогрупповых констант для различных состояний ячейки проводится по схеме (рис. 1 Блок решения КУ). Определяется набор параметров интерполяции для данной ячейки. Определяется номинальное состояние ячейки и выбранных параметров, определяются диапазоны изменения каждого из параметров и опорные точки в этом диапазоне. Задается время окончания расчета кампании и шаги по времени. Задается удельная мощность ячейки ( $\text{МВт}/\text{м}^3$ ), которая нужна для нормировки нейтронных потоков.

Сначала проводится расчет временного шага для номинального состояния ячейки. На данном шаге решается уравнение переноса нейтронов, рассчитываются критические параметры и многогрупповые нейтронные спектры, которые нормируются на заданную удельную мощность. Эти потоки передаются в блок кинетики ядер, где происходит расчет выгорания топлива ячейки. Проводится расчет глубины выгорания топлива данного шага.

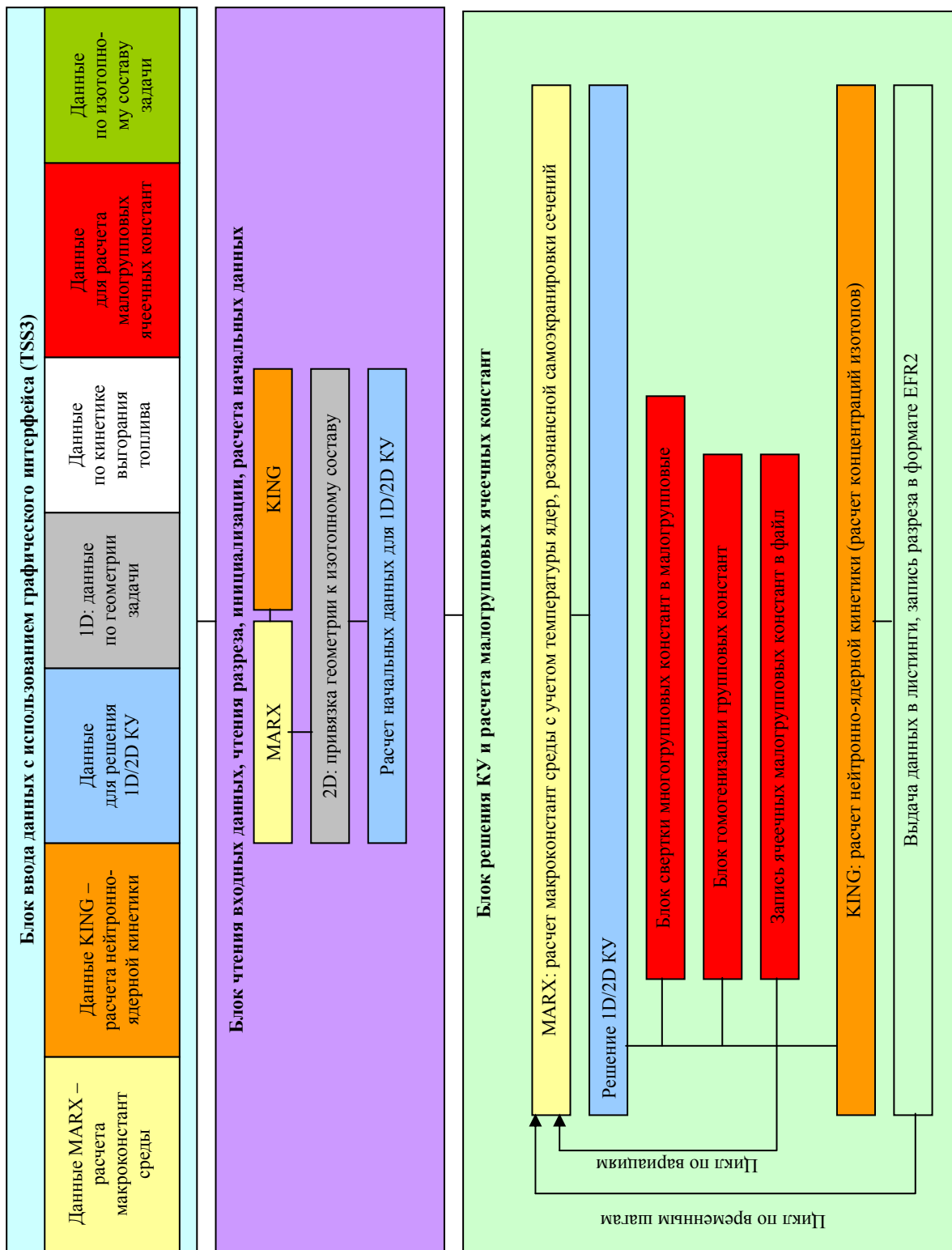


Рис. 1. Структура комплекса CONCORD

Далее происходит свертка многогрупповых констант в малогрупповые и их гомогенизация. Константы номинального состояния ячейки записываются в библиотеку.

Далее организуются циклы по всем параметрам интерполяции и по их вариациям. При этом: производится расчет уравнения переноса для данного состояния ячейки, свертка, гомогенизация и запись констант в библиотеку ячеечных констант. То есть все шаги, кроме расчета кинетики ядер и глубины выгорания топлива. Таким образом, рассчитываются гомогенные константы, отвечающие всем вариациям состояний ячейки. Далее переход к следующему шагу по времени.

Для получения малогрупповых гомогенных констант, описывающих все состояния для фиксированной глубины выгорания топлива отдельной ячейки, необходимо провести решение многогруппового уравнения переноса нейтронов для каждого из ее состояний.

Для проведения динамических 3D-расчетов реакторных установок необходимо получить библиотеку малогрупповых гомогенных констант, описывающую все состояния всех типов ячеек на все моменты времени по выгоранию. Сейчас данная процедура выполняется комплексом CONCORD на персональных компьютерах. И для нескольких десятков типов ячеек, для каждой из которых составлен список из 5–7 параметров интерполяции, имеющих по 2–3 вариации, процесс подготовки библиотеки ячеечных констант занимает несколько недель, при условии одновременного круглосуточного расчета на нескольких ПК. Это, вызвано тем, что решение многогруппового (порядка 100 групп, 10 направлений по угловой переменной и точностью сходимости итерации 1E-6) 2D-уравнения переноса нейтронов для описания конкретного состояния занимает до 2-х часов на современных персональных компьютерах.

Одним из способов ускорения этапа подготовки библиотеки ячеечных констант является применение технологий распараллеливания.

## **Разработка параллельной версии комплекса CONCORD**

Как было сказано ранее, существует только последовательная Windows версия комплекса CONCORD. Входные данные для расчета задаются с использованием, с помощью универсальной программы ввода входных данных TSS3 [0], так же Windows зависимой. Сам процесс расчета занимает значительное время.

Таким образом, создание параллельной и кросс-платформенной версии комплекса CONCORD, для ускорения процесса получения ячеечных характеристик (ячеечных констант), представляется актуаль-

ной задачей. Так как запуски параллельной версии будут проводиться из командной строки OS Linux (посредством удаленного доступа), необходимо предварительно подготовить входные данные для старта комплекса. При этом требуется сохранить максимальную совместимость с существующей технологией ввода данных. Для этого необходимо реализовать возможность старта с разреза задачи полученного после этапа чтения входных данных и формирования ее начальных данных.

## **Менеджер задач параллельной версии комплекса CONCORD**

Данную задачу призван решить менеджер задач комплекса CONCORD. Для его реализации выбран язык C#, платформа Windows Presentation Foundation (WPF), шаблон проектирования (паттерн) Model-View-ViewModel (MVVM) [0, 0], для связи с неуправляемым кодом (библиотекой EFR2 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]) используется технология Marshaling.

Выбор обусловлен тем, что подготовка пакетов задач, состоящих из модифицированных, задач последовательной версии комплекса CONCORD, осуществляется исключительно под OS Windows. Кроме того, платформа WPF предоставляет богатую функциональность для построения графического пользовательского интерфейса, так как основана на технологии DirectX. Что снимает все ограничения на визуальное представление данных любой природы и сложности.

Шаблон проектирования MVVM был разработан специально для использования при с приложений на платформе WPF и позволяет создавать гибкие составные приложения.

Основная концепция шаблона – разделение приложения на 3 основных уровня (рис. 2): Представление – пользовательский интерфейс, отвечает только за отображение; Модель – данные, физические или иные (это могут быть файлы, информация из Баз Данных и т. д.); Модель Преставления – промежуточный слой между моделью и представлением, отвечает за подготовку данных к отображению, обработку действий пользователя и остальные операции. Благодаря такой иерархии, получается слабо связанное приложение, в котором можно без труда заменить любой из компонентов.

Как было сказано ранее, программа должна проверять список параметров интерполяции ячеечных констант, хранящийся в efr файле задачи. За работу с форматом efr отвечает C++ библиотека EFR2. Соответственно возникает необходимость обеспечить взаимодействие между C# (управляемый код) и C++ (неуправляемый код). И это возможно, благодаря

технологии Маршалинг (Marshaling). Внешний вид менеджера задач показан на рис. 3.

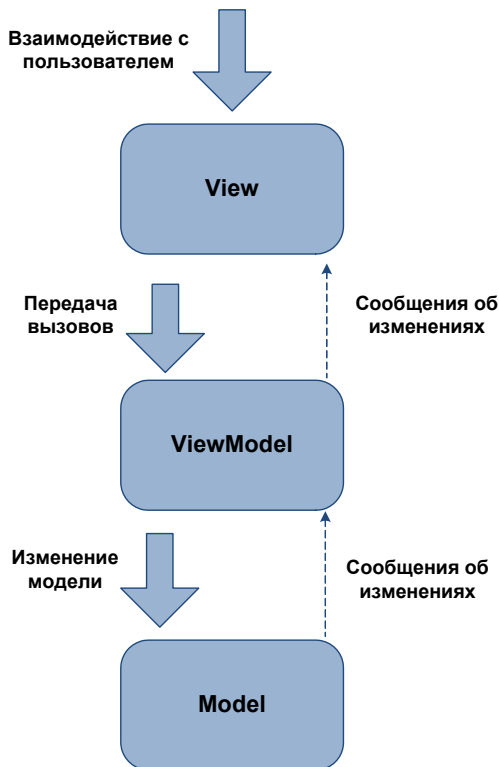


Рис. 2. MVVM

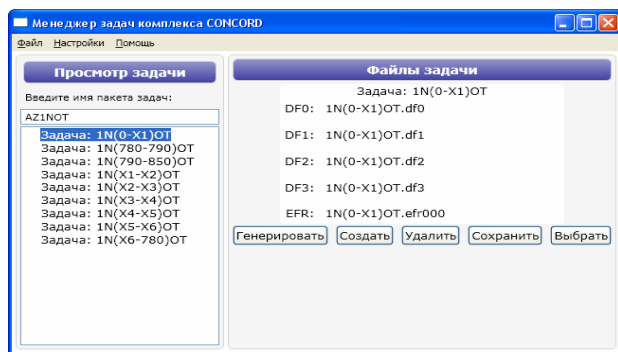


Рис. 3. Программа менеджер

Ключевым моментом является наличие в связываемой библиотеке P/Invoke функций, т.е. таких, к которым возможно сделать процедуру маршалинга. А именно, вся работа с памятью должна осуществляться с помощью CoTaskMemAlloc и CoTaskMemFree. Функции библиотеки EFR2 не обеспечивают такого механизма работы с памятью, вследствие чего возникла необходимость разработать P/Invoke функции, обеспечивающие требуемую программе функциональность. А именно: чтение и запись определенных данных efr файла. Так как все функции работают с efr файлом, то они были объединены в динамическую библиотеку.

Входными данными для программы являются файлы df наборов микроконстант задачи и efr файл-

разрез с информацией о задаче. Эти данные являются необходимыми и достаточными для ее запуска.

Рассмотрим формат файла описания пакета задач (табл. 1). Структура данного файла специально подбиралась наиболее простой, для того чтобы при необходимости можно было вручную переконфигурировать уже готовую задачу. Включение задач в существующий пакет нужно производить только в программе, потому что она автоматически производит проверку согласованности данных задач друг с другом.

Таблица 1

Формат файла описания пакета задач

Имя файла: <Имя пакета задач>.txt		
Номер строки	Тип	Описание
1	Целое	$N$ – количество задач в пакете
2	Целое	Два числа: NTotalParam – общее число параметров; NParam – количество не нулевых (имеющих вариации)
3	Целое	NTotalParam чисел, каждое значение – число вариаций соответствующего параметра
4 – $N$	Строка	Имя задачи пакета задач

### Стратегия работы параллельной версии комплекса CONCORD

Параллельная версия комплекса будет запускаться при помощи средств MPI. Отсюда возникает необходимость старта комплекса без графического пользовательского интерфейса, с файла разреза задачи. Для этого были внесены изменения в программный код комплекса.

Особое внимание уделить инициализации и планированию параллельных операций и обменов. Выбор стратегии распараллеливания комплекса с использованием библиотеки MPI обусловлен более широкими возможностями по сравнению с OpenMP.

Изначально планировалось распараллелить решение Кинетического уравнения (КУ) по группам с использованием средств OpenMP, так как процесс распараллеливания в этом случае сводится к правильной настройке доступа к переменным в общей памяти и расстановке соответствующих директив.

При дальнейшем анализе задачи, было решено отказаться от данного решения. Так как, возрастающее число параметров интерполяции и число их вариаций требует большего числа процессоров, поэтому использование MPI является более актуальным. Отметим, что вариации параметров интерполяции не зависят друг от друга, поэтому организовать распараллеливание можно довольно просто. Еще один плюс, в том, что на каждом временном шаге (шаге по выгоранию) для расчета вариаций нужны только



номинальные параметры, то есть необходимо выполнить всего один обмен за шаг.

Кроме того, использование MPI допускает дальнейшее использование гибридной с OpenMP методики распараллеливания. В принятой схеме распараллеливания, используется распараллеливание по вариациям параметров интерполяции.

Рассмотрим схему распараллеливания более подробно. Количество процессорных элементов, участвующих в расчете может быть любым в следующих границах: оно должно быть не меньше числа задач в пакете и не больше произведения числа параметров интерполяции на число задач в пакете.

Стратегия работы параллельной программы следующая. Сразу после входа в главную программу, выполняется инициализация параллельной программы. Каждый процесс определяет свой ранг и общее число процессов, участвующих в запуске. Глобальным главным или ведущим, считается процесс с рангом 0. Каждый процесс считывает информацию из файла конфигурации комплекса. Главный процесс выполняет чтение файла пакета задач. После чего выполняет широковещательную рассылку имени пакета задач. Далее, из исходного пула процессов, формируются группы, для работы над задачами пакета. Это осуществляется при помощи расщепления исходного коммутатора `MPI_COMM_WORLD` функцией `MPI_Split` на новые не пересекающиеся коммуникационные пространства (рис. 4).

Каждое полученное коммуникационное пространство соответствует одной задаче из пакета за-

дач. Каждый процесс определяет свой новый ранг и число процессов в новом коммутаторе, общим с ним. Главными процессами для каждого коммуникационного пространства задачи считаются те, чей новый ранг равен 0.

Далее ведущие задач запрашивают у глобально-го главного процесса задачи для расчета. После чего вся работа ведется внутри групп задач. Главный процесс задачи выполняет широковещательную рассылку имени задачи всем процессам в одной с ним группе. Выполняется создание необходимой инфраструктуре каталогов и вызов программы инициализации начальных данных.

В главной программе счета, для расчета нейтронных спектров по веществам и параметра  $K_{эф}$  были организованы циклы по вариациям параметров интерполяции. За расчет одной задачи отвечает группа процессов. Их число может варьироваться в пределах от 1 до  $N$ , где  $N$  – число параметров интерполяции + 1 (для расчета номинального состояния). Поэтому возникает вопрос о распределении параметров вариаций между процессами задачи. При этом важно максимально сбалансировать расчет, т. е. максимально равномерно распределить параметры интерполяции между процессами. Стоит отметить, что головной процесс отвечает за расчет номинального состояния, поэтому должен получить минимальное число параметров для расчета. Так как от скорости его расчета и его данных, зависят все остальные процессы в группе.

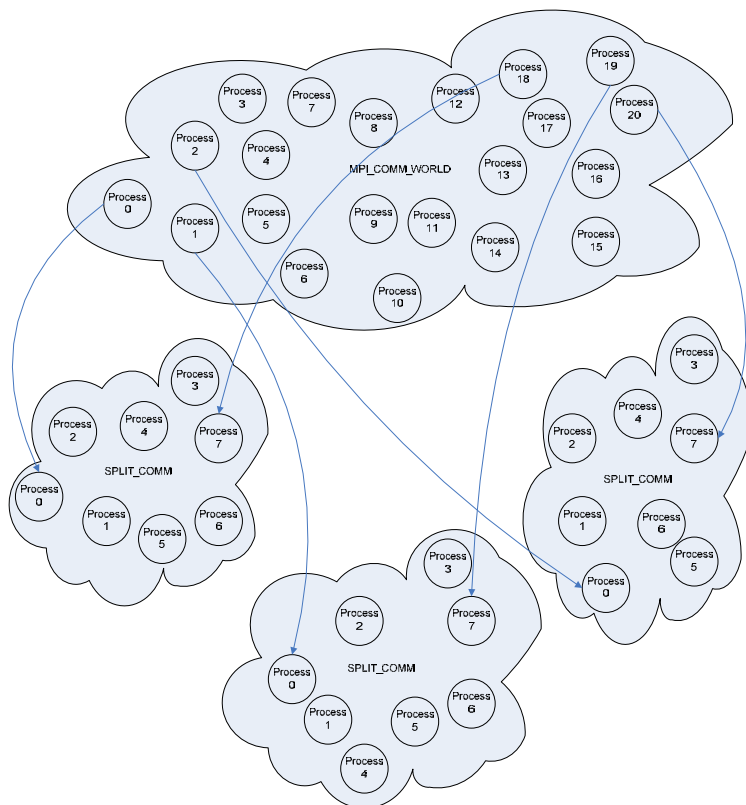


Рис. 4. Деление коммуникационного пространства

Например, пусть у нас есть задача с 6 параметрами интерполяции. В ее решении могут участвовать от 1 до  $N = 6 + 1 = 7$  процессов. Соответственно, возможны следующие варианты распределений параметров, представленные в табл. 2.

Из таблицы видно, что чем меньше ранг – тем меньше вариаций он будет рассчитывать. Это распределение удовлетворяет требованию, что главный процесс, должен получить наименьшее из возможных число параметров интерполяции. Так в первом случае в расчете участвует только главный процесс, он выполняет весь расчет. Во втором – два процесса. И так далее. Наиболее интересным представляется случай для 4 процессов. Автором были предложены следующие формулы расчетов количества параметров интерполяции, для каждого процесса. Определим число параметров интерполяции, по формуле (1):

$$G_{size} = \left\lceil \frac{N_{par}}{N_{proc}} \right\rceil, \quad (1)$$

где  $G_{size}$  – будем называть grain size, минимальное количество параметров интерполяции, рассчитываемых одним процессом;  $N_{par}$  – число параметров интерполяции задачи;  $N_{proc}$  – число процессов участвующих в решении задачи;  $\lceil \cdot \rceil$  – обозначает взятие целой части.

Так для 4-х процессов:

$$G_{size} = \left\lceil \frac{N_{par}}{N_{proc}} \right\rceil = \left\lceil \frac{7}{4} \right\rceil = \lceil 1,75 \rceil = 2.$$

Очевидно, что ни один процесс не может посчитать 1,75 параметра. Соответственно, применим условие минимума расчетов для ведущего процесса. И округлим 1,75 в меньшую сторону, т. е. к 1.

Осталось 6 не распределенных параметров интерполяции и 3 процесса. Для расчета количества параметров интерполяции для каждого процессора, включая нулевой, используются авторские рекуррентные формулы. Вычисления производятся каж-

дым процессором отдельно, исходя из своего ранга и числа процессоров, участвующих в решении задачи.

Формулы (2) учитывают ограничение не дублируемости параметров интерполяции (ни какие два процесса задачи не будут рассчитывать один и тот же параметр интерполяции) и принцип минимума расчетов ведущего процесса.

$$G_{size}^i = \left\lceil \frac{N_{par} - N_{par}^i}{N_{proc} - i} \right\rceil, \quad (2)$$

где  $N_{par}^i$  – число распределенных параметров интерполяции;  $G_{size}^i$  – текущий размер порции распределения;  $i$  – ранг процесса.

Заметим, что для процесса с рангом 0, формулы (2) вырождаются в (1).

$$\begin{aligned} i &= 0; \\ N_{par}^0 &= 0; \\ G_{size} &= \left\lceil \frac{N_{par}}{N_{proc}} \right\rceil. \end{aligned}$$

На основании, количества интерполяций, рассчитываемых каждым процессом, были получены величины начальных и конечных индексов для циклов главной программы счета. При этом в вырожденном случае, когда весь расчет ведется одним процессом, комплекс работает точно так же как и в последовательном режиме.

Еще одна важная модификация главной программы счета, касается, зависимостей дочерних процессов от ведущего по данным. Ведущий, рассчитывает номинальные состояния ячейки. Для продолжения счета каждый из ведомых процессов должен получить эти данные от ведущего. Поэтому, в начале каждого шага цикла по выгоранию производится широковещательная рассылка всех необходимых данных от ведущего процесса, всем процессам в группе.

Таблица 2

Распределение вариаций по процессам

Количество процессов	Число параметров интерполяции							Количество вариаций на процессе
	1	2	3	4	5	6	7	
1	■	■	■	■	■	■	■	7
2	■	■	■	■	■	■	■	3
3	■	■	■	■	■	■	■	2
4	■	■	■	■	■	■	■	1
5	■	■	■	■	■	■	■	1
6	■	■	■	■	■	■	■	1
7	■	■	■	■	■	■	■	1

В конце каждого счетного шага по выгоранию, каждый процесс, записывает рассчитанные данные ячеечных констант в выходной файл специального формата, уникальный для каждого процесса. Для получения результирующего файла, нужно произвести объединение файлов всех процессов в один.

Ранее, типичный процесс объединения состоял из следующих этапов:

- файлы ячеечных констант задачи конвертировались из двоичных файлов в текстовые с помощью программы `df_txt`;

- полученные в результате работы `df_txt` текстовые файлы объединялись `txt_txt` в один текстовый файл;

- итоговый текстовый файл с объединенными ячеечными константами конвертировался при помощи `txt_df` в двоичный файл специального формата.

Данный способ получения объединенных ячеечных констант весьма неудобен, а на больших объемах данных, просто неприемлем, так как требует множественных преобразований, а как следствие ресурсов. Кроме того, все программы являются отдельными, то есть не являются составной частью комплекса CONCORD и должны быть вызваны отдельно, после завершения работы комплекса, в строго определенном порядке.

Поэтому, для хранения и работы с ячеечными константами, были разработаны структуры данных, с использованием которых задачу создания объединенных файлов ячеечных констант задачи можно решить минуя множественные конвертации форматов, то есть напрямую. Автором был реализован полный набор подпрограмм и функций, обеспечивающих создание объединенных файлов ячеечных констант задачи.

## Результаты тестирования параллельной версии комплекса CONCORD

Для тестирования программы менеджера задач и параллельной версии комплекса CONCORD, использующего подготовленные им данные, на многопроцессорной суперЭВМ была проведена серия расчетов ячеечных констант для ТВС 1-го типа.

Для этого с помощью разработанной программы менеджера был сформирован пакет задач, каждая из которых соответствовала расчету определенного слоя ТВС заданным набором параметров интерполяции со своими вариациями. Ниже представлено описание текстового файла для запуска пакета задач, полученного в программе менеджере.

```

9
4 3
2 2 2 0
1N(0-X1)OT
1N(780-790)OT
1N(790-850)OT

```

```

1N(X1-X2)OT
1N(X2-X3)OT
1N(X3-X4)OT
1N(X4-X5)OT
1N(X5-X6)OT
1N(X6-780)OT

```

Здесь 1N – идентификатор типа ТВС, значение в скобках соответствует определенному слою (по высоте) ТВС, идентификаторы OT – его заданному номинальному теплогидравлическому состоянию.

В качестве параметров интерполяции использовались следующие величины:

Параметр интерполяции	Вариации
Температура теплоносителя, К	293
	640
Плотность теплоносителя, г/см <sup>3</sup>	0,3
	1
Температура топлива, К	293
	1200

Номинальное значение параметров интерполяции:

Параметр интерполяции	Вариации
Температура теплоносителя, К	293
Плотность теплоносителя, г/см <sup>3</sup>	0,998
Температура топлива, К	293

Время расчета пакета задач 63 процессами (7 процессов на задачу, 1 процесс – 1 вариация) составило 1 час 23 минуты, 9-ю процессами – 8 часов 59 минут (1 процесс – 1 задача, 7 вариаций), а одним – 2 дня 17 часов 55 минут. Таким образом, ускорение:

$$S = \frac{T_{seq}}{T_{par}};$$

$$S_{1-63} = \frac{3955}{83} = 47,65;$$

$$S_{9-63} = \frac{4851}{83} = 58,44,$$

где  $S_{1-63}$  – ускорение (время расчета в минутах пакета задач в последовательном режиме к времени расчета в параллельном режиме 63-мя процессами);  $S_{9-63}$  – реальное ускорение (время расчета в минутах пакета задач 9-ю процессами к времени расчета в параллельном режиме 63-мя процессами).

А эффективность:

$$E = \left( \frac{S}{P} \right) \cdot 100\%;$$

$$E_{1-63} = \left( \frac{47,65}{63} \right) \cdot 100\% = 75,6\%;$$

$$E_{9-63} = \left( \frac{58,44}{63} \right) \cdot 100\% = 92,7\%;$$

где  $E_{1-63}$  – эффективность;  $E_{9-63}$  – реальная эффективность.

Также для иллюстрации получаемого выигрыша во времени, на РС с процессором Intel Core 2 Quad 2,4 ГГц был проведен в последовательном режиме расчет одной вариации, который занял 1 час 30 минут. Соответственно, расчет всего пакета задач в этом случае занимает: 5670 минут = 3 дня 22 часа 30 минут, что значительно больше.

### Заключение

В результате работы по разработке параллельной кросс платформенной версии комплекса CONCORD были получены следующие результаты:

- создана параллельная кросс платформенная версия комплекса CONCORD для проведения массовых расчетов нейтронно-физических характеристик ячеек реакторов;

- с применением современных программных технологий разработан менеджер задач комплекса CONCORD для проведения массовых расчетов на суперЭВМ;

- с использованием разработанных программ проведены расчеты на суперЭВМ ячеечных констант одного из реальных типов ТВС модельной кассетной сборки, показавшие ускорение счета в 58 раз, а эффективность 92 %.

Применение методов распараллеливания и организации новой технологии получения библиотек ячеечных констант на многопроцессорных супер-

ЭВМ позволяют проводить массовые расчеты ячеечных констант для трехмерных динамических расчетов реакторов в кратчайшие сроки.

### Литература

1. Звенигородская О. А., Шагалиев Р. М., Шемякина Т. В., Данилова Е. Н. и др. Сравнительные расчеты одной трехмерной нестационарной тестовой задачи для реакторной установки РБМК по программам KORAT-3D, DINA, STEPAN и Z3DAM (ACADEM) // ВАИТ. Сер. математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 4. С. 3–10.

2. Крутько Н. А. Универсальный программный пакет TSS3 для построения пользовательского интерфейса программных комплексов на языке Фортран // ВАИТ. Сер. математическое моделирование физических процессов. В печати.

3. John Gossman «Introduction to Model/View/ViewModel pattern for building WPF apps» <http://blogs.msdn.com/johngossman/archive/2005/10/08/478683.aspx>.

4. Джош Смит (Josh Smith) «Шаблоны. Приложение WPF с шаблоном проектирования модель-представление-модель представления» // MSDN Magazine. Февраль 2009.

5. Волгин А. В., Красов А. В., Кузнецов М. Ю., Тарасов В. И. Библиотека ЕФР для универсального представления расчетных данных // Труды РЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. Вып. 11. С. 130–135.

# ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОЛЬФРАМА С ЭФФЕКТИВНЫМ УЧЕТОМ ИОНИЗАЦИИ

А. А. Каякин, Д. Г. Гордеев, Л. Ф. Гударенко<sup>1</sup>, В. Г. Куделькин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Современные теоретические модели уравнений состояния (УРС) позволяют проводить вычисление термодинамических характеристик вещества лишь на отдельных участках фазовой плоскости. Ввиду принципиальных трудностей последовательного теоретического подхода при создании термодинамических моделей используются определенные допущения и упрощения. Эти упрощения не являются универсальными, так как относительная значимость физических факторов, определяющих термодинамику, отличается в областях с разной температурой и плотностью.

Общепринятый подход при построении уравнений состояния ориентированных на использование в прикладных расчетах состоит в разработке полуэмпирических моделей. В этих моделях вид функциональных зависимостей устанавливается с привлечением физических представлений и допущений о поведении вещества, а совокупность экспериментальных и расчетных данных используется для определения конкретных численных значений свободных параметров в этих зависимостях. В полуэмпирических моделях неточность правдоподобных физических представлений компенсируется введением в модель свободных параметров.

Представленная в данной работе модель получена в результате модификации модели уравнения состояния, описанного в [1, 2]. При модификации усовершенствованы алгоритмы расчета вклада в давление и энергию электронов – введены соотношения, эффективно учитывающие влияние ионизации на поведение термодинамических функций. Усложнена также зависимость для представления коэффициента Грюнайзена ядер.

В данной модели, как и во многих современных полуэмпирических моделях УРС свободная энергия представлена в виде трех слагаемых:

$$F(\rho, T) = E_x(\rho) + F_p(\rho, T) + F_e(\rho, T), \quad (1)$$

где:  $\rho$  – плотность;  $E_x(\rho)$  – потенциальная («холодная») составляющая энергии;  $F_p(\rho, T)$  – тепловая («решеточная») составляющая свободной энергии, связанная с тепловым движением атомов (ядер);  $F_e(\rho, T)$  – тепловая составляющая, учитывающая движение термически возбужденных электронов.

В приведенных ниже выражениях для каждой из составляющих (1) вместо плотности  $\rho$  используется безразмерный параметр  $\delta = \rho/\rho_0$ , характеризующий отношение текущей плотности к плотности при нормальных условиях.

**Потенциальные составляющие в давлении и энергии.** В зависимостях  $P_x(\delta)$ , используемых в данной модели, выделено три участка:

$$0 \leq \delta < 1; \quad 1 \leq \delta \leq \delta_c; \quad \delta > \delta_c,$$

где  $\delta_c$  – значение относительного сжатия в точке перехода от зависимости  $P_x(\delta)$  используемой в диапазоне  $1 \leq \delta \leq \delta_c$  к зависимости  $P_x(\delta)$  рассчитанной в области сверхвысоких давлений и плотностей по выбранной теоретической модели УРС.

В диапазоне  $0 \leq \delta < 1$  для представления потенциальной составляющей энергии используется аналитическая зависимость:

$$E_x(\delta) = \frac{1}{\rho_0} \left[ a \frac{\delta^n}{n} + b \frac{\delta^m}{m} + c \frac{\delta^l}{l} \right] - \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{a}{n} + \frac{b}{m} + \frac{c}{l} \right] + E_{x0}. \quad (2)$$

Потребуем, чтобы для зависимостей  $P_x$  и  $E_x$  в диапазоне  $0 \leq \delta \leq 1$  выполнялись следующие условия:

$$P_x|_{\delta=1} = P_{x0}; \quad P_x|_{\delta=0} = 0; \quad P_x|_{\delta < 1} < 0; \quad E_x|_{\delta=1} = E_{x0}; \\ E_x|_{\delta=0} = Q_{св}; \quad \frac{dP_x}{d\delta}|_{\delta=1} = P'_{x0}; \quad \frac{d^2P_x}{d\delta^2}|_{\delta=1} = P''_{x0}. \quad (3)$$

Последние два условия означают сшивку потенциального давления до второй производной с расчетами по формулам, предназначенным для описания потенциальных составляющих на участке  $1 \leq \delta \leq \delta_c$ .

$P'_{x0}$ ,  $P''_{x0}$  – соответственно первая и вторая производная, вычисленные по этим формулам в точке  $\delta = 1$ .  $Q_{св}$  – энергия связи вещества.

При  $\delta = 1$  давление в веществе нормируется на нормальные условия  $\rho = \rho_0$ ,  $P_0 = 10^{-4}$  ГПа,  $T = 293$  К. Значение потенциального давления в точке  $\delta = 1$  определяется разностью:  $P_0 - P_T$  ( $\delta = 1$ ,  $T = 293$  К), где  $P_T = P_p + P_e$ . Значение  $P_x = 0$  будет достигаться

<sup>1</sup> Gud@vniief.ru

в точке  $\rho = \rho_{0k}$ . Константа  $E_{x0}$  в (2) выбирается из условия  $E_x(\rho = \rho_{0k}) = 0$ .

Из условий (3) можно получить формулы для определения четырех свободных параметров выражения (2). Значения оставшихся двух параметров могут быть определены из условия наилучшего описания критической точки двухфазной области жидкость-пар, точки кипения и данных, полученных в ударно волновых экспериментах при исследовании изэнтроп расширения и ударных адиабат сильно пористых образцов.

**В диапазоне**  $1 \leq \delta \leq \delta_c$  потенциальные составляющие на стадии подбора параметров рассчитываются в табличном виде по заданной ударной адиабате сплошного вещества и тепловых составляющих (подробнее см., например, [2]). В УРС при расчете  $P_x(\delta)$ ,  $E_x(\delta)$  используются не таблицы, полученные при подборе параметров, а результаты их аппроксимации, выполненной с использованием интерполяционных кубических сплайнов класса  $C^2$  [3].

**При**  $\delta > \delta_c$  потенциальные составляющие давления и энергии рассчитываются по алгоритму, обеспечивающему переход к зависимости, рассчитанной по теоретической модели УРС. Для обеспечения непрерывности функции и ее производной в точке  $\delta = \delta_c$ , используется алгоритм, аналогичный реализованному в программе PANDA [0]. По данному алгоритму при  $\delta \geq \delta_c$  для расчета потенциальной энергии используется следующая формула:

$$E_x(\delta) = (E_{\text{ТФП}}(\delta) - E_{\text{ТФП}}(\delta_c))Y(\delta) + \Delta E_x, \quad (4)$$

где  $E_{\text{ТФП}}(\delta)$  – энергия, рассчитываемая по модели Томаса–Ферми с поправками (ТФП) [0]. Формула (4) не изменится, если вместо модели ТФП будет использована другая модель для расчета  $E_x(\delta)$  в области больших плотностей и давлений.

$$Y(\delta) = 1 + (b_1 + b_2\delta^{-\alpha} + b_3\delta^{-2\alpha})\delta^{-1} - \text{интерполяционная функция.}$$

Параметр  $\alpha$  определяет скорость приближения значений потенциального давления, рассчитанного по интерполяционной зависимости (4) к значениям, рассчитанным по теоретической модели в области больших плотностей и давлений (в нашем случае к расчетам по модели ТФП). Константы  $\Delta E_x$ ,  $b_1$ ,  $b_0$  и  $b_3$  определяются из условий непрерывности функций и их производных в точке  $\delta_c$ :

$$E_x(\delta_c) = E_S(\delta_c), \quad P_x(\delta_c) = P_S(\delta_c), \quad P'_x(\delta_c) = P'_S(\delta_c), \\ P''_x(\delta_c) = P''_S(\delta_c).$$

Индексом «S» обозначены значения давления и энергии, рассчитанные (по сплайнам) на участке  $1 \leq \delta \leq \delta_c$ ; штрихом обозначены производные давления по плотности. Очевидно, что в (4)  $\Delta E_x = E_S(\delta_c)$ .

**Тепловой вклад ядер.** В данной модели вид зависимости, определяющей вклад ядер в свободную энергию, выбран таким же, как и в УРС [1, 2]. Как показала практика использования такой зависимости при разработке УРС нескольких металлов, она обладает хорошими интерполяционными свойствами и позволяет без учета изменения термодинамических функций при плавлении и полиморфных фазовых переходах непротиворечиво описать имеющиеся экспериментальные данные.

Используемая нами зависимость для  $F_p(\delta, T)$  имеет вид:

$$F_p(\delta, T) = C_{V0}^p T \left[ \ln \left( 1 - e^{-\frac{\theta(\delta, T)}{T}} \right) - \frac{1}{3} D \left( \frac{\theta(\delta, T)}{T} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\theta(\delta, T)$  – температура Дебая;  $D(x) = \frac{3}{x^3} \int_0^x t^3 e^{-t} dt - 1$  – функция Дебая.

Для вычисления функции Дебая  $D(x)$  применяется аппроксимация, представленная в работе [6].

Выражение для температуры Дебая выбрано в следующем виде:

$$\theta(\delta, T) = \theta_D(\delta) \sqrt{1 + T/\psi_p(\delta)}, \quad \theta_D(\delta) = \theta(\delta, 0).$$

Связь  $\theta_0(\delta)$  с коэффициентом Грюнайзена определяется следующим образом:

$$\theta_D(\delta) = \theta_0 \exp \left( \int_1^{\delta} \frac{\Gamma_{p0}(x)}{x} dx \right), \quad \theta_0 = \theta_D(1),$$

где  $\Gamma_{p0}(\delta)$  – функция, характеризующая зависимость от плотности коэффициента Грюнайзена ядер (решетки) «холодного» вещества (при  $T \cong 0$ ).

Функция  $\psi_p(\delta)$  приближенно характеризует высоту потенциального барьера, который нужно преодолеть атому, чтобы уйти из узла решетки, и зависит только от плотности (расстояния между атомами).  $\psi_p(\delta)$  и  $\Gamma_{p0}(\delta)$  связаны уравнением

$$\psi_p(\delta) = \psi_{p0} \delta^{-\gamma_\phi} \exp \left( 2 \int_1^{\delta} \frac{\Gamma_{p0}(\tau)}{\tau} d\tau \right), \quad (\psi_{p0} = \psi_p(1)),$$

$\gamma_\phi$  – определяет асимптотическое значение коэффициента Грюнайзена решетки при  $T \rightarrow \infty$ . Выражение (5) обеспечивает выполнение предельных переходов для изохорической теплоемкости:

$$\left( \frac{\partial E_p}{\partial T} \right)_\delta \rightarrow 0, \quad \text{при} \quad \frac{T}{\psi_p(\delta)} \rightarrow 0 \\ \text{и} \quad \left( \frac{\partial E_p}{\partial T} \right)_\delta \rightarrow \frac{C_{V0}^p}{2}, \quad \text{при} \quad \frac{T}{\psi_p(\delta)} \rightarrow \infty.$$

Таким образом, если задать согласно закону Дюлонга-Пти  $C_{V0}^p = \frac{3R}{A}$ , то при  $T \rightarrow \infty$  –  $\left(\frac{\partial E_p}{\partial T}\right)_\delta = \frac{3R}{2A}$ , то есть выполняется асимптотический переход к теплоемкости идеального одноатомного газа.

Для описания зависимости  $\Gamma_{p0}(\delta)$ , выделено два участка:  $0 \leq \delta \leq \delta_p$  и  $\delta > \delta_p$  ( $\delta_p > 1$ ). Расчет  $\Gamma_{p0}(\delta)$  в диапазоне  $0 \leq \delta \leq \delta_p$  проводится с использованием зависимости

$$\Gamma_{p0}(\delta) = A_p + \frac{(\gamma_{1p} - A_p)}{1 + (\delta/\delta_{mp})^{a_p}} + \frac{(\gamma_{2p} - A_p)}{1 + (\delta/\delta_{np})^{b_p}}. \quad (6)$$

При  $\delta \rightarrow 0$   $\Gamma_{p0}(\delta) \rightarrow \gamma_{1p}$ , при  $\delta \rightarrow \infty$   $\Gamma_{p0}(\delta) \rightarrow \gamma_{2p}$ .

Выполнение условия  $\Gamma_{p0}(\delta=1) = \gamma_{0p}$ , где  $\gamma_{0p}$  – значение коэффициента Грюнайзена при нормальных условиях, обеспечивается за счет коэффициента  $A_p$  в (6), который связан с другими параметрами зависимости следующим соотношением:

$$A_p = \left( \gamma_{0p} - \frac{\gamma_{1p}}{1 + (\delta_{mp})^{-a_p}} - \frac{\gamma_{2p}}{1 + (\delta_{np})^{b_p}} \right) / \left( 1 - \frac{1}{1 + (\delta_{mp})^{-a_p}} - \frac{1}{1 + (\delta_{np})^{b_p}} \right).$$

Параметры  $a_p, b_p, \delta_{mp}, \delta_{np}$  определяют «скорость» выхода функции  $\Gamma_{p0}(\delta)$  на асимптотические значения.

При  $\delta > \delta_p$  расчет ведется по алгоритму, обеспечивающему переход к зависимости, рассчитанной по теоретической модели для коэффициента Грюнайзена. Данный алгоритм аналогичен алгоритму, реализованному для расчета потенциальных составляющих давления и энергии при  $\delta > \delta_c$ . Для расчета  $\Gamma_{p0}(\delta)$  используется следующая формула:

$$\Gamma_{p0}(\delta) = \Gamma_{\text{lim}}(\delta) Y_\Gamma(\delta),$$

где  $\Gamma_{\text{lim}}(\delta) = 0,5 + a_{\text{lim}} \delta^{-b_{\text{lim}}} + c_{\text{lim}} \delta^{-d_{\text{lim}}}$  – выражение, аппроксимирующее расчет коэффициента Грюнайзена по модели однокомпонентной плазмы (ОКП) [9, 10], а степень ионизации рассчитана по модели ТФП (см., например, [7]);  $Y_\Gamma(\delta) = 1 + (b_{1\Gamma} + b_{2\Gamma} \delta^{-\alpha_\Gamma} + b_{3\Gamma} \delta^{-2\alpha_\Gamma}) \delta^{-1}$  – интерполяционная функция.

Константы  $b_{1\Gamma}, b_{2\Gamma}$  и  $b_{3\Gamma}$  определяются из условий непрерывности функций, первых и вторых производных в точке  $\delta_p$ . Параметр  $\alpha_\Gamma$  – в выражении для  $Y_\Gamma(\delta)$  определяет скорость приближения значений  $\Gamma_{p0}(\delta)$  к значениям  $\Gamma_{\text{lim}}(\delta)$ .

Температура плавления рассчитывается с использованием модели Линдемана в форме [8]:

$$T_{\text{пл}} = T_{\text{пл}0} \left( \frac{\delta}{\delta_{\text{пл}0}} \right)^{-2/3} \exp \left[ 2 \int_{\delta_{\text{пл}0}}^{\delta} \Gamma_{\text{пл}}(\tau) \frac{d\tau}{\tau} \right], \quad (7)$$

где  $T_{\text{пл}0}$  и  $\delta_{\text{пл}0}$  – температура и относительное сжатие (плотность) вещества в точке плавления при  $P = 1$  атм;  $\Gamma_{\text{пл}}(\delta)$  – функция, имеющая смысл коэффициента Грюнайзена ядер на линии плавления.

Зависимость  $\Gamma_{\text{пл}}(\delta)$  задается в такой же форме, как для коэффициента Грюнайзена ядер  $\Gamma_{p0}(\delta)$  при  $T = 0$  и  $0 \leq \delta \leq \delta_p$  (6). В описываемой модели уравнения состояния, в отличие от [2], параметры зависимости  $\Gamma_{\text{пл}}(\delta)$  в (7) не связаны с параметрами, используемыми для расчета коэффициента Грюнайзена в уравнении состояния.

Подстановка функции для  $\Gamma_{\text{пл}}(\delta)$  вида (6) в (7) позволяет получить аналитическую зависимость  $T_{\text{пл}}(\delta)$  для расчета температуры плавления.

Параметры зависимости (7) определяются при аппроксимации экспериментальных и расчетных данных, характеризующих положение линии плавления в диапазоне изменения плотности от значения в точке плавления при нормальном давлении до плотностей, где справедливы расчеты по модели ОКП (см., например [9, 10]). В описываемой модели УРС плавление не рассматривается как процесс, реализующийся в некоторой области состояний. По физическому смыслу модель Линдемана дает оценку границы начала плавления.

**Тепловой вклад электронов.** Свободная энергия термически возбужденных электронов от плотности и температуры задается следующими выражениями:

$$F_e(\delta, T) = -C_{V0}^e y(\delta, T) T \ln \left( 1 + \frac{T}{T_f(\delta, T)} \right), \quad (8)$$

где  $C_{V0}^e = 3R/2A$  – изохорная теплоемкость электронов в одном грамме однократно ионизованного идеального одноатомного газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $A$  – молярная масса;  $T_f(\delta, T) = 2C_{V0}^e/\beta_0 [y(\delta, T)\delta]^{2/3}$  – функция, имеющая смысл характеристической температуры, определяющей переход от квантовой статистики Ферми-Дирака к статистике Больцмана ( $\beta_0$  – коэффициент элек-



тронной теплоемкости);  $y(\delta, T) = Z - [Z - y_0(\delta)] \times [g_1(T)(1 - \zeta(\delta)) + g_2(T, \delta)\zeta(\delta)]$  – функция, эффективно учитывающая изменение среднего числа свободных электронов на атом при изменении плотности и температуры ( $Z$  – атомный номер);  $y_0(\delta) = Z_b - \frac{Z_b - Z_a}{1 + (\delta/\delta_{ne})^{a_e}}$  – предел функции  $y(\delta, T)$  при  $T \rightarrow 0$ ;  $Z_a$  и  $Z_b$  значения функции  $y_0(\delta)$  при  $\delta = 0$ ,  $\delta \rightarrow \infty$  соответственно.

Функции  $g_1(T)$ ,  $g_2(T, \delta)$  и  $\zeta(\delta)$  определяются соотношениями:

$$g_1(T) = \exp\left[-\left(\frac{T}{\Psi_1}\right)^{\alpha_1}\right],$$

$$g_2(T, \delta) = \frac{1}{1 + \left[\frac{T}{(\Psi_2(1 + a_\Psi \delta^{b_\Psi}))}\right]^{\alpha_2}},$$

$$\zeta(\delta) = \frac{1}{a_\zeta + \left(\frac{\delta}{b_\zeta}\right)^{c_\zeta}}.$$

Функция  $F_e(\delta, T)$  (8) содержит 14 подгоночных параметров ( $\beta_0, \Psi_1, \Psi_2, a_\Psi, b_\Psi, \alpha_1, \alpha_2, a_\zeta, b_\zeta, Z_a, Z_b, a_e, \delta_{ne}$ ), из них 13 – параметры функции  $y(\delta, T)$ .

Выражения для свободной энергии и функции  $y(\delta, T)$  обеспечивают выполнение следующих асимптотик:

$$\left. \begin{aligned} F_e(\delta, T) &\rightarrow -\frac{\beta_0 T^2}{2\delta^{-2/3}} [y_0(\delta)]^{1/3} \\ y(\delta, T) &\rightarrow y_0(\delta) \\ \left(\frac{\partial E_e}{\partial T}\right)_\delta &\rightarrow \frac{\beta_0 T}{\delta^{-2/3}} [y_0(\delta)]^{1/3} \end{aligned} \right\} \text{при } T \rightarrow 0,$$

$$\left. \begin{aligned} F_e(\delta, T) &\rightarrow -C_{V0}^e Z T \ln\left(\frac{\beta_0 T}{2C_{V0}^e} [Z\delta]^{-2/3}\right) \\ y(\delta, T) &\rightarrow Z \\ \left(\frac{\partial E_e}{\partial T}\right)_\delta &\rightarrow Z C_{V0}^e \end{aligned} \right\} \text{при } T \rightarrow \infty.$$

Таким образом, при низких температурах асимптотикой для электронной составляющей является первая температурная поправка для вырожденного электронного газа, в которой  $F_e(\delta, T) \sim T^2$  [11].

При высоких температурах, выполняются асимптотики для полностью ионизованного, описываемого

статистикой Больцмана, идеального газа с числом электронов  $Z$  на один атом [11].

Функция  $\zeta(\delta)$  входящая в состав  $y(\delta, T)$  задает вес функций  $g_1(T)$  и  $g_2(T, \delta)$  в определении  $y(\delta, T)$  на изохорах. Ограничением на  $\zeta(\delta)$  служит условие  $0 \leq \zeta(\delta) \leq 1$ . Для этого достаточно, чтобы  $a_\zeta \geq 1$ .

Выражения для  $g_1(T)$  и  $g_2(T, \delta)$  выбраны такими, чтобы при  $T = 0$  они обращались в единицу и, следовательно, выполнялось равенство  $y(\delta, T) = y_0(\delta)$ .

При  $T \rightarrow \infty$  функции  $g_1(T) \rightarrow 0$ ,  $g_2(T, \delta) \rightarrow 0$  и, как следствие,  $y(\delta, T) \rightarrow Z$ . На параметры этих функций накладываются следующие ограничения:  $\Psi_1, a_\Psi, b_\Psi, \alpha_1, \Psi_2, \alpha_2 > 0$ .

Описанная модель УРС дополнена алгоритмами для вычисления термодинамических функций на границе и внутри двухфазной области жидкость-пар.

**Уравнение состояния вольфрама.** С использованием описанной модели разработано уравнение состояния  $W$ .

На рис. 1–8 продемонстрировано описание расчетами по УРС данной работы экспериментальных данных, расчетов по модели ТФПК (модель ТФП [5] с учетом вклада ядер по модели ОКП [14]) и расчетов выполненных методом функционала плотности (МФП).

В представленном уравнении состояния вольфрама в точке кипения и критической точке значения давления, плотности и температура следующие:  $T_{\text{кип}} = 5960$  К,  $\rho_{\text{кип}} = 16$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{кр}} = 4,54$  г/см<sup>3</sup>,  $T_{\text{кр}} = 16140$  К,  $P_{\text{кр}} = 1,1$  ГПа. Эти значения согласуются с данными приведенными в разных источниках [22–29]. Представленные на рисунках результаты показывают, что разработанное уравнение состояния вольфрама, одновременно описывает большинство экспериментальных данных для этого вещества и удовлетворительно согласующееся с расчетами по модели ТФПК в области сверхвысоких давлений и температур.

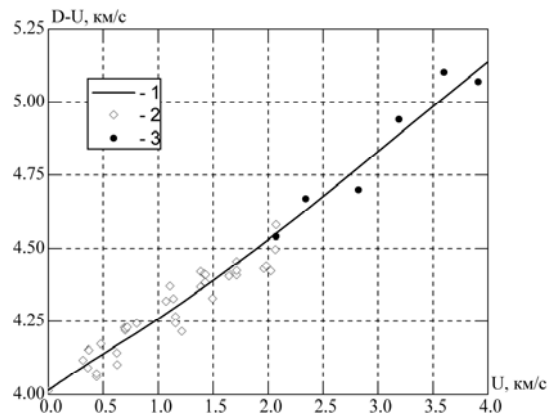


Рис. 1. Зависимость разности скорости фронта ударной волны и массовой скорости от массовой скорости от сплошного вольфрама ( $\rho_0 = 19,25$  г/см<sup>3</sup>): 1 – расчет по УРС данной работы. Эксперимент: 2 – [12], 3 – [13]

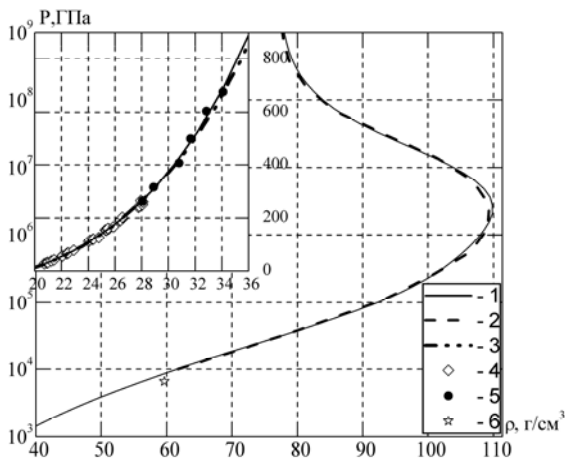


Рис. 2. Зависимость давления от плотности на ударной адиабате сплошного вольфрама ( $\rho_0 = 19,25 \text{ г/см}^3$ ): 1 – расчет по УРС данной работы; 2 – ТФПК [5,14]; 3 – МФП [16]. Эксперимент: 4 – [12], 5 – [13], 6 – [15]

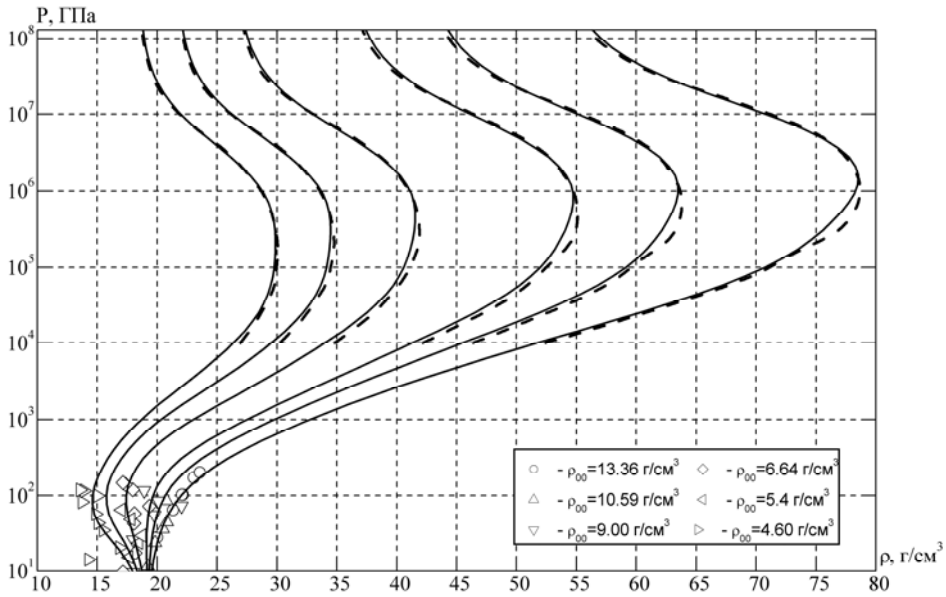


Рис. 3. Зависимость давления от плотности на ударных адиабатах пористого вольфрама: сплошные линии – расчет по УРС данной работы; пунктирные – ТФПК [5, 14]; маркеры – эксперимент [19, 20, 21]

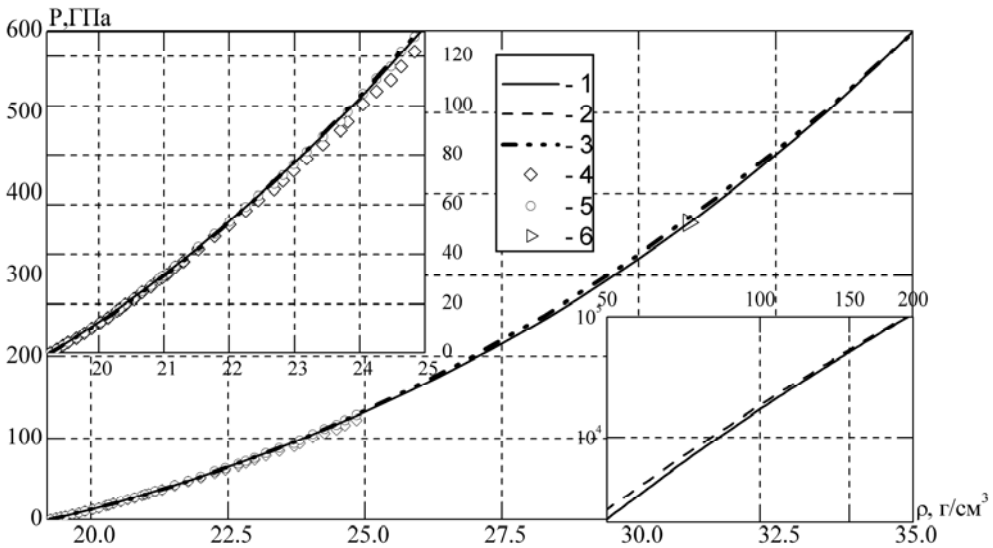


Рис. 4. Зависимости давления от плотности на изотерме  $T = 293 \text{ К}$ : 1 – расчет по УРС данной работы; 2 – ТФПК [5, 14]; 3 – МФП [16]. Эксперимент: 4, 5 – [17]; 6 – [18]

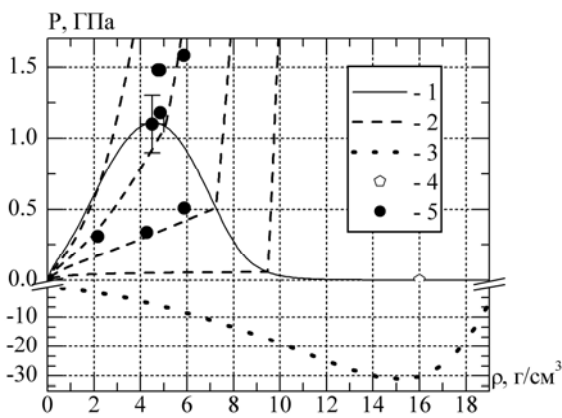


Рис. 5. Зависимости от плотности потенциального и полного давления на границе двухфазной области жидкость-пар, на изэнтропах, проходящих через двухфазную область. Расчет по УРС данной работы: 1 – граница двухфазной области; 2 – изэнтропы расширения; 3 – потенциальное давление; 4 – точка кипения; 5 – данные разных авторов по оценке положения критической точки вольфрама [22–29]

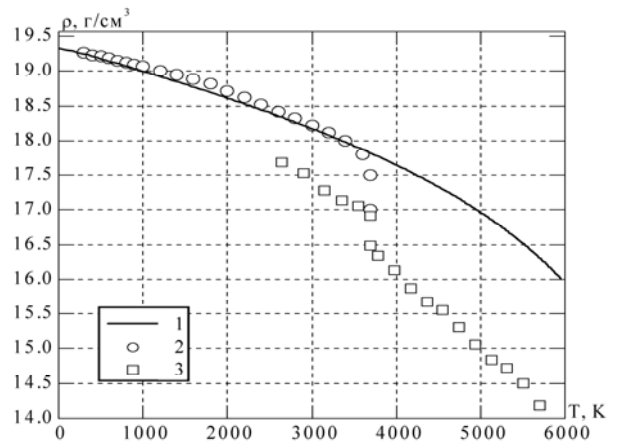


Рис. 8. Зависимость плотности вольфрама от температуры при нормальном давлении: 1 – по УРС данной работы; эксперимент: 2 – [34]; 3 – [35]

## Литература

1. Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Жернокле- тов М. В., Куделькин В. Г., Мочалов М. А. Полуэм- пирическое уравнение состояния металлов. Уравне- ние состояния алюминия // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 2. С. 61–75.

2. Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Жернокле- тов М. В., Куделькин В. Г., Мочалов М. А. Полуэм- пирическая модель уравнения состояния металлов РОСА-М. Уравнение состояния алюминия // Вопро- сы атомной науки и техники. Сер: Теоретическая и прикладная физика. 2005. Вып. 3. С. 24–36.

3. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошничен- ко В. К. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.

4. Kerley G. I. User's Manual for PANDA: A Com- puter Code for Calculating Equations of State, Los Ala- mos National Laboratory report LA-8833-M (November 1981).

5. Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В. Таблицы тер- модинамических функций вещества при высокой концентрации энергии: Препринт № 35. М.: ИПМ АН СССР, 1975.

6. Гордеев Д. Г., Ломайкин А. И. Аппроксима- ция функции Дебая  $D_3(x)$  в области  $0 \leq x < \infty$  функ- цией класса  $C^2$  // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 1. С. 42–50.

7. Hitose Nagara, Tuto Nakamura. Theory of lat- tice-dynamical properties of compressed solids / Phys. Rev. B. 1985. Vol. 31, N 4. P. 1844–1855.

8. Grover Richard. Liquid Metal Equation of State Based on Scaling // Chemical Physics. 1971. Vol. 55, N 7. P. 3435–3441.

9. Hansen J. P. Statistical Mechanics of Dense Ion- ized Matter. I. Equilibrium Properties of the Classical One-component Plasma // Phys. Rev. A. 1973. Vol. 8, N 6. P. 3096–3109.

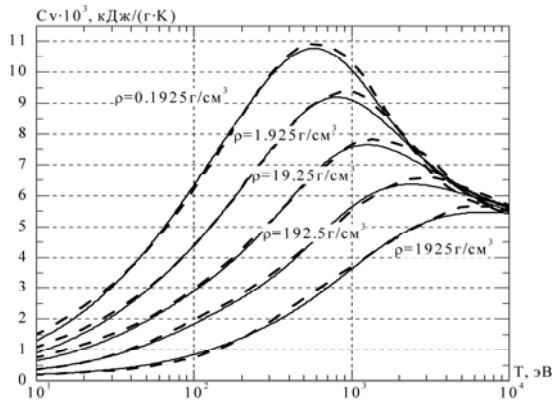


Рис. 6. Зависимости удельной изохорной теплоемкости вольфрама от температуры вдоль изохор. Расчет: сплошные линии – по УРС данной работы; пунктирные – ТФПК [5, 14]

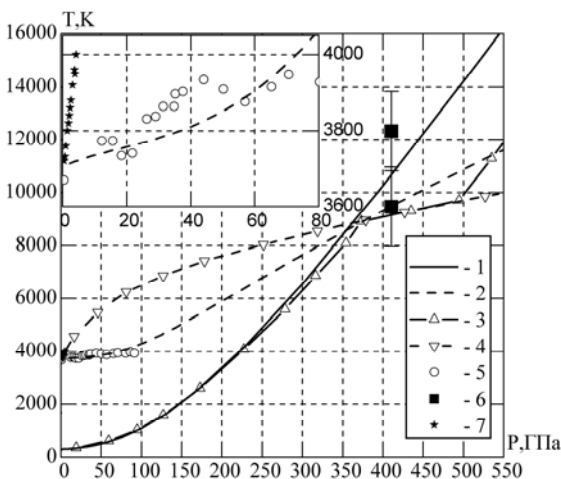


Рис. 7. Зависимость температуры от давления на ударной адиабате и на линии плавления. Расчет на линии плавления: 2 – по УРС данной работы; 4 – УРС работы [30]. Расчет на ударной адиабате: 1 – по УРС данной работы; 3 – УРС работы [30]. Эксперимент на линии плавления: 5 – [31]; 6 – [32]; 7 – [33]

10. Pollock E. L., Hansen J. P. Statistical Mechanics of Dense Ionized Matter. II. Equilibrium Properties and Melting Transition of the Crystallized One-component Plasma // *Phys. Rev. A*. 1973. Vol. 8, N 6. P. 3110–3122.
11. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966.
12. LASL Shock Hugoniot Data // Ed. Marsh S. P., Berkley: Univ. of California Press, 1980.
13. Hixson R. S., Fritz J. N., Deeney C., Asay J. R. Shock compression of tungsten and molybdenum // *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 71, N 4. P. 1721.
14. Копышев В. П. О термодинамике ядер одноатомного вещества: Препринт № 59. 1978. М.: ИПМ АН СССР.
15. Ragan III C. E. Shock compression measurements at 1 to 7 TPa // *Phys. Rev. Ser. A*. 1982. Vol. 25, N 6. P. 3360–3375.
16. Wang Yi, Chen D., Zhang X. Calculated Equation of State of Al, Cu, Ta, Mo, and W to 1000 GPa // *Phys. Rev. L* 2000. Vol. 84. P. 3220.
17. Dewaele A., Loubeyre P., Mezouar M. Equations of state of six metals above 94 GPa // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70. P. 094112.
18. Ruoff A. L., Xia H., Luo H., Vohra Y. K. Miniaturization techniques for obtaining static pressures comparable to the pressure at the center of the earth: X-ray diffraction at 416 GPa // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. Vol. 61, N 12. P. 3830.
19. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Трунина Р. Ф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
20. Boade R. R. Dynamic Compression of Porous Tungsten // *Journal of applied physics*. August 1969. Vol. 40, N 9. P. 3781–3785.
21. Dattatraya P. Dandekar and Roger M. Lamothe. Behavior of porous tungsten under shock compression at room temperature // *Journal of Applied Physics*. 1977. Vol. 48, N 7. P. 2871–2879.
22. Roland W. Ohse, Hilmar von Tippelskirch. The critical constants of the elements and of some refractory materials with high critical temperatures // (A review). *High Temperatures-High Pressures*, 1977, Vol. 9. P. 367–385.
23. Фортвов В. Е., Дремин А. Н., Леонтьев А. А. Оценка параметров критической точки // *Теплофизика высоких температур*. 1975. Т. 13, № 5. С. 1072–1080.
24. Ломоносов И. В. Фазовые диаграммы и термодинамические свойства металлов при высоких давлениях и температурах. Дис. ... док. ф. м. наук Черногловка.
25. Seydel U., Bauhof H., Fucke W., Wadle H. Thermophysical data for various transition metals at high temperatures obtained by a submicrosecond-pulse-heating method. *High Temp. – High Press.* 1979. Vol. 11, N 6. P. 635–642.
26. Fucke U., Seydel W. Improved experimental determination of critical point data for tungsten // *High Temp. – High Press.* 1980. Vol. 12, N 4. P. 419–432.
27. Ternovoi V., Filimonov A., Fortov V., Gordon Yu., Nikolaev D., Pyalling A. Liquid-vapor phase boundaries determination by dynamic experimental method // *Bull. Amer. Phys. Soc.* 1999. Vol. 44, N 2. P. 95.
28. Alder B., Young D. Critical point of metals from the van der Waals model // *Phys. Rev. Ser. A*. 1971. Vol. 3, N 1. P. 364–371.
29. Rakhel A. D., Kloss A., Hess H. On the Critical Point of Tungsten // *International Journal of Thermophysics*. 2002. Vol. 23, N 5. P. 1369.
30. Kerley G. I. Equations of State for Be, Ni, W, and AU, Sandia report SAND 2003-3784 (October 2003).
31. Errandonea D., Schwager B., Ditz R., Gessmann C., Boehler R., Ross M. Systematics of transition-metal melting // *Phys. Rev. B*. 2001. Vol. 63. P. 132104.
32. Feng Xi, Lingcang Cai. Theoretical study of melting curves on Ta, Mo, and W at high pressures // *Physica B*. 2008. Vol. 403. P. 2065.
33. Kloss A., Hess H., Schneidenbach H., Grossjohann R. // Scanning the Melting Curve of Tungsten by a Submicrosecond Wire-Explosion Experiment // *International Journal of Thermophysics*. 2002. Vol. 20, N 4. P. 1999.
34. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Metallurgia, 1989.
35. Hixson R. S., Winkler M. A. Thermophysical Properties of Solid and Liquid Tungsten // *International Journal of Thermophysics*. 1990. Vol. 11, N 4. P. 709.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛЭГАК-ДК

Д. Ю. Дьянов, Е. И. Корсакова, Г. П. Симонов, К. В. Циберев, Е. В. Шувалова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Пакет программ ЛЭГАК–ДК разрабатывается для численного решения широкого круга трехмерных и двумерных задач газодинамики, динамического упругопластического деформирования и разрушения конструкций. Численная методика основана на методе конечных элементов в лагранжевой, лагранжево-эйлеровой и эйлеровой постановках на неструктурированных сетках. При этом типы ячеек могут быть различны, но основу составляют шестигранники и четырехугольники. Аппроксимация по времени осуществляется с использованием двух схем на выбор: схема методики ЛЭГАК [1] и схема «крест» [2].

Рассмотрим замыкающие соотношения основной системы уравнений, описывающей движение сплошной среды. А именно, уравнения, определяющие полный тензор напряжения: уравнения состояния; закон Гука в упругой области и критерий пластичности Мизеса в пластической области течений.

Тензор напряжений Эйлера (Коши) для упругопластических материалов интегрируется по времени следующим образом:

$$\sigma_{ij}(t + dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij} dt.$$

Производная по времени тензора напряжений может быть записана в следующем виде:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ik} \Omega_{kj} + \sigma_{jk} \Omega_{ki},$$

где  $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$  – тензор вращения;  $\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}$  – тензор напряжений, вычисленный по Яуманну;  $C_{ijkl}$  – матрица упругих постоянных, а  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – тензор скоростей деформаций:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right).$$

Тензоры скоростей деформаций и вращения вычисляются в заданных точках элемента с использованием терминов матрицы деформация-смещение:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sum_{k=1}^{N_{\text{узлов}}} \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_j} v_i^k.$$

Таким образом, для вычисления тензора напряжений мы можем записать следующие разностные формулы:

1. Для схемы «крест»:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + r_{ij}^n + \sigma_{ij}^{\nabla(n+\frac{1}{2})} \Delta t^{n+\frac{1}{2}},$$

где  $\sigma_{ij}^{\nabla(n+\frac{1}{2})} \Delta t^{n+\frac{1}{2}} = C_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl}^{n+\frac{1}{2}}$ ,  $\Delta \epsilon_{kl}^{n+\frac{1}{2}} = \dot{\epsilon}_{kl}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}}$ ,

$$r_{ij}^n = \left( \sigma_{ip}^n \omega_{pj}^{n+\frac{1}{2}} + \sigma_{jp}^n \omega_{pi}^{n+\frac{1}{2}} \right) \Delta t^{n+\frac{1}{2}}.$$

Для материалов, у которых давление есть функция относительного изменения объема, энергии или температуры соответствующая разностная запись девiatorа тензора напряжений имеет вид:

$$s_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + p^n \delta_{ij} + r_{ij}^n + C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}}.$$

2. Для схемы методики ЛЭГАК:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + r_{ij}^n + \sigma_{ij}^{\nabla(n+1)} \Delta t^n,$$

где  $\sigma_{ij}^{\nabla(n+1)} \Delta t^n = C_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl}^{n+1}$ ,  $\Delta \epsilon_{kl}^{n+1} = \dot{\epsilon}_{kl}^{n+1} \Delta t^n$ ,  $r_{ij}^n = \left( \sigma_{ip}^n \omega_{pj}^{n+1} + \sigma_{jp}^n \omega_{pi}^{n+1} \right) \Delta t^n$ .

Разностная запись девiatorа тензора напряжений имеет вид:

$$s_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + p^n \delta_{ij} + r_{ij}^n + C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^{n+1} \Delta t^n.$$

В пластической области девiator тензора напряжений подчиняется условию текучести Мизеса:

$$\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  – предел текучести. Если условие нарушается, что означает переход в область пластического течения, то производится пересчет девiatorа напряжений:

$$s_{ij\text{пл}} = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{3/2 sp (S^2)}} s_{ij}. \quad (2)$$

В настоящее время в пакете программ ЛЭГАК-ДК реализованы уравнения состояния и модели упругопластического деформирования и разрушения как пакета LS-DYNA, так и внутренние уравнения состояния и модели методики ЛЭГАК. Одно из главных преимуществ созданной структуры программы расчета тензора напряжений – это возможность быстрого подключения любой из библиотек, определяющей давление, скорость звука, модули упругости и предел текучести в зависимости от напряженно-деформируемого состояния вещества в ячейке.

Рассмотрим подробнее некоторые реализованные в пакете программ ЛЭГАК-ДК уравнения состояния и модели упругопластического деформирования и разрушения.

### Уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния идеального газа записывается следующим образом:

$$p = (\gamma - 1)\rho e,$$

где  $\gamma$  – константа,  $\rho$  – плотность,  $e$  – удельная внутренняя энергия.

### Полиномиальное уравнение состояния

Полиномиальное уравнение состояния определяется следующим соотношением:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)e,$$

где  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – константы,  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,  $\rho_0$  – начальная плотность.

### Уравнение состояния Грюнрайзена

Уравнение состояния Грюнрайзена записывается в следующем виде.

Величины давление и скорость звука на адиабате сжатия определяется уравнениями:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)\rho e.$$

Скорость звука находится из соотношения  $c^2 = \frac{dp}{d\rho}$ . Зная, что  $dp = \frac{\partial p}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial p}{\partial e} de$ , получим:

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{\partial p}{\partial \rho} + \frac{\partial p}{\partial e} \frac{de}{d\rho} = \frac{\partial p}{\partial \rho} + \frac{\partial p}{\partial e} \frac{p}{\rho^2}.$$

Найдя частные производные  $\frac{\partial p}{\partial \rho}$  и  $\frac{\partial p}{\partial e}$ , получим выражение для скорости звука:

$$c^2 = \frac{C^2 \left[ 1 + (2 - \gamma_0)\mu - \frac{3}{2}a\mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} - \frac{2C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a\mu^2}{2} \right] \left[ 1 - S_1 - S_2 \frac{\mu^2 + 2\mu}{(\mu + 1)^2} - S_3 \frac{\mu^3 + 3\mu^2}{(\mu + 1)^3} \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^3} + ae + (\gamma_0 + a\mu)\rho_0 \frac{p}{\rho^2}$$

На адиабате расширения:

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)\rho e,$$

$$c^2 = C^2 + ae + (\gamma_0 + a\mu)\rho_0 \frac{p}{\rho^2},$$

где  $C, \gamma_0, S_1, S_2, S_3$  – константы.

### Модель упругого материала

Простейшая модель – это модель упругого материала.

Основные уравнения модели следующие. Компоненты девиатора тензора напряжений определяют согласно закону Гука:

$$\dot{s}_{ij} = 2G\dot{\epsilon}_{ij}, \quad (3)$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

Уравнение для модуля сдвига следующее:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (4)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона (являются параметрами модели).

Давление в этой модели не определяется по уравнению состояния, а вычисляется по формуле:

$$p^{n+1} = -K \ln(V^{n+1}), \quad (5)$$

где  $K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$  – объемный модуль сжатия,  $V$  – относительный объем, то есть отношение текущего объема к начальному.

## Модель упругопластического материала с кинематическим упрочнением

Модель упругопластического материала с кинематическим упрочнением является аналогом модели MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC пакета LS-DYNA [2, 3] и используется для расчета упругопластического материала с учетом изотропного и кинематического упрочнения.

В упругой области компоненты девиатора тензора напряжений  $s_{ij}$  определяются согласно закону Гука (3). Условие текучести для этой модели записывается в следующем виде:

$$\frac{3}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0,$$

где  $\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}$ ,  $s_{ij}$  – компоненты девиатора тензора напряжений,  $\alpha_{ij}$  – центр поверхности пластичности. Предел текучести определяется по формуле:  $\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p$ , где  $\sigma_0$  – начальный предел текучести,  $\beta$  – параметр упрочнения,  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация,  $E_p$  – модуль пластического упрочнения. Модуль пластического упрочнения записывается в следующем виде:

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $E_t$  – касательный модуль, являющиеся параметрами модели.

Если условие текучести нарушается, то рассчитываются пластическая деформация  $\varepsilon_p^{n+1} = \varepsilon_p^n + \Delta \varepsilon_p$ ,

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\sqrt{3/2 \xi_{ij} \xi_{ij}} - \sigma_y}{3G + E_p},$$

центр поверхности пластичности и компоненты девиатора тензора напряжений определяются по формулам:

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n + \frac{(1-\beta) E_p \Delta \varepsilon_p}{\sqrt{3/2 \xi_{ij} \xi_{ij}}} \xi_{ij},$$

$$s_{ij}^{n+1} = s_{ij} - \frac{3G \Delta \varepsilon_p}{\sqrt{3/2 \xi_{ij} \xi_{ij}}} \xi_{ij}.$$

В данной модели предусмотрена также возможность учета кинематического упрочнения за счет величины скорости деформации. Для этого необходимо задать параметры модели  $C$  и  $P$  отличными от нуля. Тогда в уравнении для предела текучести добавляется множитель:

$$\sigma_y = \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right) (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p),$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации.

Давление вычисляется как в модели упругого материала (5).

## Модель Джонсона–Кука

В комплексе программ ЛЭГАК-ДК реализована хорошо известная модель Джонсона-Кука [4], которая предназначена для расчета сдвиговых течений при больших значениях скоростей деформаций.

Основные уравнения модели следующие. В упругой области компоненты девиатора тензора напряжений  $s_{ij}$  рассчитываются согласно закону Гука (3).

Условие текучести записывается в виде (1).

Предел текучести является функцией трех переменных: пластической деформации  $\varepsilon_p$ , интенсивности скоростей пластических деформаций  $\dot{\varepsilon}_p$  и температуры  $T$ :

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = \begin{cases} \left( A + B(\varepsilon_p)^N \right) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^M \right), & \dot{\varepsilon}_p > \dot{\varepsilon}_0 \\ \left( A + B(\varepsilon_p)^N \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^M \right), & \dot{\varepsilon}_p \leq \dot{\varepsilon}_0 \end{cases},$$

$$G = G_0$$

где  $A, B, N, C, M$  – константы;  $T_0$  – начальная температура;  $T_m$  – температура плавления;  $\dot{\varepsilon}_0$  2 параметр модели.

Если условие текучести нарушается, компоненты  $s_{ij}$  пересчитываются по формуле (2):

Для вычисления давления в этой модели необходимо задать уравнение состояния.

## Модель кусочно-линейного упругопластического материала

В пакете программ ЛЭГАК-ДК реализована модель кусочно-линейной пластичности, которая является аналогом модели MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY пакета LS-DYNA [2, 3]. Модель используется для моделирования материалов с произвольной зависимостью между напряжением и деформацией, а также с произвольной зависимостью от скорости деформации.

В упругой области компоненты девиатора тензора напряжений  $s_{ij}$  рассчитываются согласно закону Гука (3). Условие текучести имеет вид (1). Для данной модели предел текучести  $\sigma_y$  в условии (1) – динамический предел текучести:



$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) = \begin{cases} \sigma_y^s(\varepsilon_p) + SIGY \left( \dot{\varepsilon}_p / C \right)^{1/P}, & SIGY > 0; \\ \sigma_y^s(\varepsilon_p) \left( 1 + \left( \dot{\varepsilon}_p / C \right)^{1/P} \right), & SIGY = 0, \end{cases}$$

здесь  $SIGY, C, P$  – константы,  $\sigma_y^s$  – статический предел текучести, который определяется из заданных кривых.

Если условие текучести (1) нарушается, вычисляется пластическая деформация  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_p^{n+1} = \varepsilon_p^n + \Delta\varepsilon_p, \quad \Delta\varepsilon_p = \frac{\sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}} - \sigma_y}{3G + E_p},$$

с учетом формул (4) и (6) соответственно для модуля сдвига и модуля пластического упрочнения, и определяются компоненты девиатора тензора напряжений по формуле (2).

Если задана кривая, то модуль пластического упрочнения полагается равным нулю.

Давление вычисляется как в модели упругого материала (5).

## Модель пористых материалов

Модель пористых материалов является аналогом модели MAT\_HONEYCOMB пакета LS-DYNA [2, 3, 5, 6] и используется для моделирования пористых материалов с анизотропными свойствами.

Основные принципы модели следующие. Поведение материала определяется параметром

$$\beta = \max \left[ \min \left( \frac{1 - V_{\min}}{1 - V_f}, 1 \right), 0 \right], \quad \text{где } V_{\min} \text{ – минимальное}$$

значение относительного объема за время счета;  $V_f$  – константа.

Модуль Юнга и модуль сдвига рассчитываются для каждого направления по следующим формулам:

$$\begin{aligned} E_{aa} &= E_{aa0} + \beta(E - E_{aa0}); & G_{ab} &= G_{ab0} + \beta(G - G_{ab0}); \\ E_{bb} &= E_{bb0} + \beta(E - E_{bb0}); & G_{bc} &= G_{bc0} + \beta(G - G_{bc0}); \\ E_{cc} &= E_{cc0} + \beta(E - E_{cc0}); & G_{ca} &= G_{ca0} + \beta(G - G_{ca0}), \end{aligned}$$

где  $G$  – модуль сдвига для сжатого вещества, определяемый по формуле (4);  $E$  – модуль Юнга для сжатого вещества – константа;  $E_{aa0}, E_{bb0}, E_{cc0}, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$  – константы.

Компоненты тензора напряжений для пористого материала находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{aa}^{n+1*} &= \sigma_{aa}^n + E_{aa} \Delta\varepsilon_{aa}; & \sigma_{ab}^{n+1*} &= \sigma_{ab}^n + 2G_{ab} \Delta\varepsilon_{ab}; \\ \sigma_{bb}^{n+1*} &= \sigma_{bb}^n + E_{bb} \Delta\varepsilon_{bb}; & \sigma_{bc}^{n+1*} &= \sigma_{bc}^n + 2G_{bc} \Delta\varepsilon_{bc}; \\ \sigma_{cc}^{n+1*} &= \sigma_{cc}^n + E_{cc} \Delta\varepsilon_{cc}; & \sigma_{ca}^{n+1*} &= \sigma_{ca}^n + 2G_{ca} \Delta\varepsilon_{ca}. \end{aligned}$$

Далее для каждой компоненты тензора напряжений проверяется, не превысило ли ее значение максимально допустимое. И если превысило, т. е.  $|\sigma_{ij}^{n+1}| > \sigma_{ij}(1-V)$ , то компоненты тензора напряжений пересчитываются следующим образом:  $\sigma_{ij}^{n+1} =$

$$= \sigma_{ij}(1-V) \sigma_{ij}^{n+1*} / \left| \sigma_{ij}^{n+1*} \right|.$$

Величина  $\sigma_{ij}(1-V)$  определяется из заданных кривых.

Давление для пористого материала определяется следующим образом:

$$p^{n+1} = \left( \sigma_{aa}^{n+1} + \sigma_{bb}^{n+1} + \sigma_{cc}^{n+1} \right) / 3.$$

Если вещество полностью сжалось, то его поведение описывается как идеальное упругопластическое. Согласно закону Гука (3) вычисляются компоненты девиатора тензора напряжений  $s_{ij}$  в упругой области. Если условие текучести Мизеса (1) нарушается, то компоненты  $s_{ij}$  пересчитываются по формуле (2), где  $\sigma_y$  – предел текучести для сжатого вещества, является константой модели.

Давление вычисляется следующим образом:

$$p^{n+1} = p^n - K \operatorname{div}(\vec{u}),$$

где  $K$  – объемный модуль,  $\vec{u}$  – вектор скорости.

## Модель хрупкого материала Джонсона–Холмквиста

Модель пластического разрушения Джонсона–Холмквиста является аналогом модели MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS пакета LS-DYNA [2, 3, 7, 8]. Она используется для моделирования керамики, стекла, и других хрупких материалов.

Эта модель описывает поведение материала следующим образом. Сначала материал ведет себя как упругий. При переходе в пластическую область начинает накапливаться поврежденность. Поврежденность вычисляется в зависимости от параметра поврежденности и уровня накопленной пластической деформации. Таким образом, поведение материала определяется неповрежденной кривой, поврежденной кривой, а также величиной параметра поврежденности. При разгрузке материал ведет себя как упругий до момента хрупкого разрушения, после чего происходит мгновенное разрушение.

Рассмотрим данную модель подробнее. Основные уравнения модели следующие:

1. На первом этапе вычисляются компоненты девиатора тензора напряжений  $s_{ij}$  согласно закону Гука (3) и скорость деформации  $\dot{\varepsilon}$ .

2. Далее вычисляется давление  $p$  следующим образом.

Пока материал не начал разрушаться, т. е. параметр поврежденности  $D = 0$ , давление определяется как:  $p = k_1\mu + k_2\mu^2 + k_3\mu^3$ , где  $k_1, k_2, k_3$  – константы.

При разгрузке материала это уравнение превращается в следующее:  $p = k_1\mu$ .

Когда начинает накапливаться поврежденность, т. е.  $D > 0$ , добавляется приращение давления  $\Delta P$ :  $p^{n+1} = k_1\mu + k_2\mu^2 + k_3\mu^3 + \Delta P^n$ .

Увеличение давления при накоплении поврежденности связано с тем, что часть упругой энергии  $\beta$  превращается в гидростатическую потенциальную энергию (давление):

$$\Delta P^n = -k_1\mu + \sqrt{\left(k_1\mu + \Delta P^{n-1}\right)^2 + 2\beta k_1 \Delta U},$$

$$\Delta U = \frac{(\sigma_{\text{упр}})^2 - (\sigma)^2}{12G},$$

где  $\sigma_{\text{упр}} = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$  – эффективное напряжение в упругой области,  $\sigma$  – эффективное напряжение в пластической области.

Приращение давления  $\Delta P$  меняется от 0 при параметре поврежденности  $D = 0$  до  $\Delta P_{\text{max}}$  при  $D = 1$ .

3. Следующим этапом находится кривая, описывающая поведение неповрежденного материала:

$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$ , где \* означает, что величина нормализована, т. е.  $P^* = P/P_{\text{HEL}}$ ,  $T^* = T/P_{\text{HEL}}$ ,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\varepsilon_0$ ,  $\sigma^* = \sigma/\sigma_{\text{HEL}}$  (справедливо для  $\sigma_{\text{упр}}, \sigma_i, \sigma_f, \sigma$ ),  $\sigma_{\text{HEL}} = \frac{3}{2}(HEL - P_{\text{HEL}})$ .  $A, C, N, T, \varepsilon_0, HEL, P_{\text{HEL}}$  – константы.

Если достигли кривой  $\sigma_i$ , т. е.  $\sigma_{\text{упр}}^* \geq \sigma_i^*$ , начинается накапливаться повреждение  $D^{n+1} = \sum \Delta \varepsilon_p / \varepsilon_f^p$  за счет приращения пластической деформации  $\Delta \varepsilon_p$ :

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\sigma_{\text{упр}}^{n+1} - \left(\sigma_i^{n+1} - D^n (\sigma_i^{n+1} - \sigma_f^{n+1})\right)}{3G},$$

где  $\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \leq \text{SFMAX}$  – кривая, описывающая поведение поврежденного материала;  $B, M, C, \text{SFMAX}$  – константы. Если значение  $\sigma_f^*$  превышает величину SFMAX, то полагается  $\sigma_f^* = \text{SFMAX}$ .  $\varepsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2}$  – пластическая

деформация разрушения;  $D_1, D_2$  – константы. Параметр  $D_1$  управляет скоростью накопления повреждений. Если он задается равным нулю, полное разрушение происходит за один счетный шаг, то есть мгновенно.

Зная параметр поврежденности  $D$ , кривые  $\sigma_i^*$  и  $\sigma_f^*$ , можно найти кривую, описывающую поведение материала:  $\sigma^{*n+1} = \sigma_i^{*n+1} - D^{n+1}(\sigma_i^{*n+1} - \sigma_f^{*n+1})$ .

Величина параметра поврежденности меняется от 0 до 1. Если параметр поврежденности достиг значения  $D = 1$ , вещество разрушено, и поведение материала описывается кривой  $\sigma_f^*$ .

4. Пересчитываются напряжения  $s_{ij}^{n+1} = s_{ij} \sigma / \sigma_{\text{упр}}$ .

## Модели разрушения

Существует два вопроса, связанных с реализацией моделей разрушения:

- 1) выбор критерия разрушения,
- 2) определение поведения разрушенного материала и материала с повреждениями.

Критериев разрушения существует достаточно много, многие из них реализованы в пакете ЛЭГАК-ДК. Это к примеру, критерий по давлению, по полному напряжению, по деформации, по скорости деформации, по пластической деформации, по компоненте сдвиговой деформации, по энергии и так далее.

Поведение разрушенного материала в настоящее время определяется в пакете ЛЭГАК-ДК следующим способом. Если в элементе срабатывает заданный критерий, то элемент выбрасывается из расчета. Это моделирование схоже с образованием трещины в этом элементе.

## Результаты тестовых расчетов

### Плоская ударная волна

Начальная геометрия задачи приведена на рис. 1.

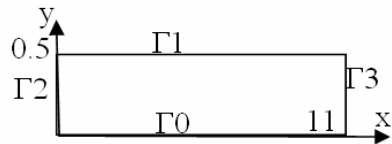


Рис. 1. Начальная геометрия задачи о плоской ударной волне

Начальные условия:  $p_0 = 0$  ГПа,  $\rho_0 = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $e_0 = 0$  кДж/г,  $u_0 = 0$  км/с.  
 $G = 15$  ГПа,  $Y = 1$  ГПа.

Уравнение состояния:  $p = (\gamma - 1)\rho e$ ,  $\gamma = 3$ .

Граничные условия: границы Г0, Г1, Г3 – жесткие стенки, на границе Г2 задавалось постоянное граничное давление  $p = 5$  ГПа. Счетная область  $\{0 \leq x \leq 11 \text{ см}, 0 \leq y \leq 0,5 \text{ см}\}$  разбивалась на 550 столбцов по оси  $x$  и 10 строк по оси  $y$ . Расчеты проводились по методике ЛЭГАК-ДК (схема LS-DYNA и схема ЛЭГАК).

На рис. 2 приведены профили скорости на момент времени  $t = 20$  мкс и аналитическое решение. Как видно из рисунка, результаты, полученные по методике ЛЭГАК-ДК по схемам LS-DYNA и ЛЭГАК совпадают и близки к аналитическому решению.

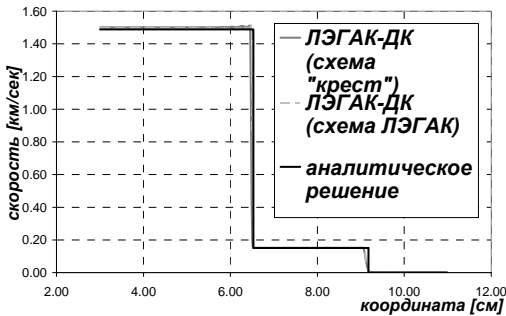


Рис. 2. Профили скорости

### Радиальные колебания цилиндрической упругой оболочки

Рассматривается цилиндрическая оболочка. В начальный момент в оболочке задается радиальная скорость  $u_0 = 0,1$  км/с. Далее элементы оболочки совершают одномерные окружные колебания. Для этой задачи имеется аналитическое решение, полученное в оболочечном приближении.

Период упругих окружных колебаний в аналитическом решении находится по формуле:

$$T = 2\pi R_0 / \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

и не зависит от толщины оболочки. Здесь  $E$  – модуль Юнга материала,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $R_0$  – радиус срединной поверхности.

Полагалось  $E = 210$  ГПа,  $R_0 = 61,5$  см,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu = 0,3$ . Толщина  $h = 3$  см.

Начальная геометрия задачи представлена на рис. 3. Расчеты проводились в идеально упругой постановке.

На границах Г0, Г1 задавалась свободная поверхность, на границах Г2, Г3 – жесткая стенка. Счетная область разбивалась на 4 строки по оси  $Y$  и 133 столбца по оси  $X$ .

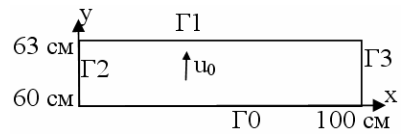


Рис. 3. Начальная геометрия задачи о радиальных колебаниях цилиндрической упругой оболочки

На рис. 4 приведено решение, полученное по методике ЛЭГАК-ДК. Период колебаний совпадает с точным решением [8].

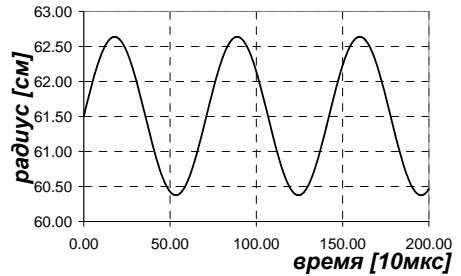


Рис. 4. Зависимость изменения радиуса срединной поверхности от времени

Расчеты проводились до момента времени  $t = 800$  (10 мкс). На рис. 4 для наглядности результаты приведены до момента времени  $t = 200$  (10 мкс). С течением времени амплитуда и период колебаний в численном решении остаются строго постоянными.

### Стержень Тейлора

Для тестирования модели пластичности Джонсона–Кука реализованной в пакете программ ЛЭГАК-ДК была выбрана постановка из статьи [9].

Рассматривается задача о столкновении деформируемого цилиндрического стержня с жесткой неподвижной преградой при заданной начальной скорости соударения  $u_0$ .

Начальная геометрия счетной области показана на рис. 4. Начальная длина  $L_0 = 2,54$  см и диаметр стержня  $d = 0,76$  см. В качестве жесткой преграды задается граничное условие – жесткая стенка. Остальные границы – свободные по верхности. В начальный момент в стержне задается скорость  $u_0 = 0,221$  км/с. Задавалось уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена с постоянным коэффициентом Грюнайзена. Параметры уравнения состояния и модели сдвиговой прочности представлены в табл. 1.

При разбиении счетной области используется неструктурированная сетка размером 72420 ячеек (рис. 5). При этом по длине счетная область разбивалась на 68 ячеек.

Рис. 6 демонстрирует конечные формы, рассчитанные по методике ЛЭГАК в сравнении с расчетами из работы [9].

## Параметры уравнения состояния

Вещество	$\gamma$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$c$ , км/с	$n$	$\nu$	$A$ , ГПа	$B$ , ГПа	$C$	$n$	$m$	$T_m$ , К	$c_v$ , кДж/г <sup>0</sup> К
Железо	2,333	7,89	5,5	3,5	0,27	0,175	0,38	0,06	0,32	0,55	1538	0,000452

Таблица 2

## Экспериментальные данные и результаты расчетов

	$D_f$ , см	$L_f$ , см	$W_f$ , см	$\bar{\Delta}$
Эксперимент	1,37	1,98	0,86	–
ЛЭГАК-ДК	1,207	1,96	0,906	0,06
Работа [9]	–	–	–	0,025

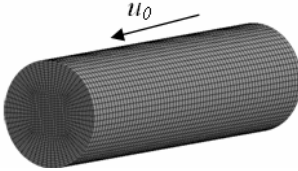


Рис. 5. Начальная геометрия задачи (стержень Тейлора)

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{3} \left( \frac{|L_f - L_{\text{exp}}|}{L_{\text{exp}}} + \frac{|D_f - D_{\text{exp}}|}{D_{\text{exp}}} + \frac{|W_f - W_{\text{exp}}|}{W_{\text{exp}}} \right)$$

## Обжатие куба

Для тестирования модели хрупкого материала Джонсона–Холмквиста была выбрана постановка из статьи [7].

Начальная геометрия задачи приведена на рис. 7. У куба со сторонами 1 м пять сторон – жесткие стенки, причём нижние узлы жестко закреплены, а к шестой стороне куба (верхней) прикладывается давление  $p = 2$  ГПа (рис. 7). Под действием давления куб сначала сжимается до момента времени  $t = 0,0676$  мкс, а потом растягивается ( $p = -2$  ГПа). Куб рассматривается как один элемент. Было проведено 3 тестовых расчета, в которых варьировались параметры модели. Начальные данные и параметры модели приведены в табл. 3.

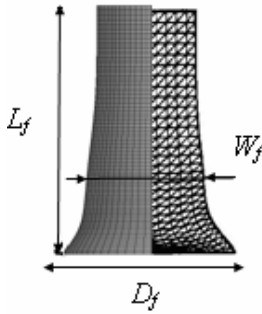


Рис. 6. Результаты расчетов (слева – ЛЭГАК-ДК, справа – результат из работы [9])

В табл. 2 приведены экспериментальные данные конечной формы образца и результаты расчетов, полученные по программе ЛЭГАК-ДК. В работе [9] не даны расчетные значения конечной формы, сравнительные оценки с экспериментом определяются величиной средней ошибки, рассчитываемой по следующей формуле:

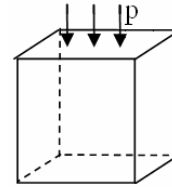


Рис. 7. Начальная постановка задачи обжатия куба

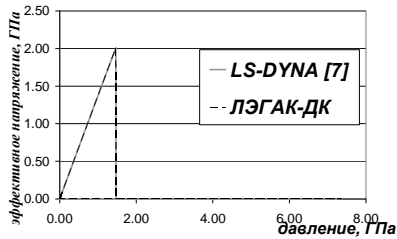
Таблица 3

## Константы уравнений

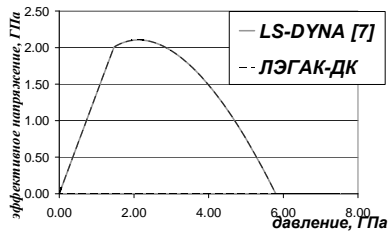
Параметры модели	Расчет 1	Расчет 2	Расчет 3	Параметры модели	Расчет 1	Расчет 2	Расчет 3
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	3700	3700	3700	HEL, ГПа	2,79	2,79	2,79
$G$ , ГПа	90,16	90,16	90,16	PHEL, ГПа	1,46	1,46	1,46
Константы прочности				Константы разрушения			
$A$	0,93	0,93	0,93	D1	0	0,005	0,005
$B$	0	0	0,31	D2	0	1	1
$C$	0	0	0	Константы уравнения состояния			
$M$	0	0	0,6	K1, ГПа	130,95	130,95	130,95
$N$	0,6	0,6	0,6	K2, ГПа	0	0	0
EPSI	1	1	1	K3, ГПа	0	0	0
$T$ , ГПа	0,2	0,2	0,2	BETA	1	1	1
SFMAX, ГПа	0	0	0				

При расчете с первым набором констант не возникают пластические деформации, а также после разрушения отсутствуют напряжения. Расчет со вторым набором констант отличается от предыдущего расчета тем, что при повреждении могут возникать пластические деформации. При расчете с третьим набором констант также могут возникать пластические деформации, а, кроме того, могут возникать напряжения в разрушенном материале.

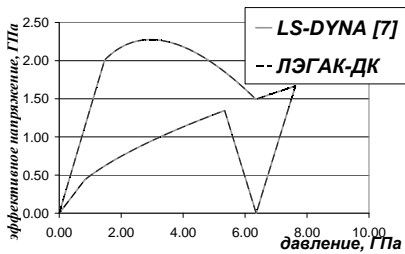
На рис. 8 приведены графики зависимости эффективного напряжения от давления для расчетов 1, 2 и 3. Результаты, полученные по комплексу программ ЛЭГАК-ДК и совпадают с результатами из работы [7], полученными по LS-DYNA.



а



б



в

Рис. 8. Зависимость эффективного напряжения от давления: а – расчет 1; б – расчет 2; в – расчет 3

1. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бакулина Е. А., Безрукова И. Ю., Борляев В. В., Володина Н. А., Наумов А. О., Огнева Н. Э., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Тихонова А. П., Циберев К. В., Шанин А. А., Ширшова М. О., Шувалова Е. В. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2004. Вып. 4. С. 41–50.

2. Hallquist J. O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006.

3. Hallquist J. O. LS-DYNA keyword user's manual. Volume 1. Livermore Software Technology Corporation, 2009.

4. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures 7th Inter. Symposium ballistics. The Hague. The Netherlands. 1985. P. 541–548.

5. Hirth A., Bois P. D., Weimar K. A material model for transversely anisotropic crushable foams in LS-DYNA // 7<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference. Material Technology (2). Germany.

6. Tabiei A., Chowdhury M. R. Transient response of a projectile in gun launch simulation using lagrangian and ALE methods // 8<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference.

7. Cronin D. S., Bui K., Kaufmann C., McIntosh G., Berstad T. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA // 4<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference. Material 1. Canada.

8. Johnson G. R., Holmquist T. J. An improved computational constitutive model for brittle materials // American Institute of Physics, 1994.

9. Johnson G. R., Holmquist T. J., Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants // J App. Phys. Vol. 64, N 8, October 1988, P. 3901–3910.

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*И. А. Крючков, С. В. Копкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В проведенных ранее работах [1, 2, 3] получены результаты по адаптации различных частей комплекса МД для расчетов на гибридных вычислительных системах.

Проведение молекулярно-динамического моделирования процессов определяющих свойства конструкторных материалов является очень трудоемким и требует значительных вычислительных ресурсов. Часть расчетов по комплексу МД уже ведется на гибридных вычислительных системах.

В настоящей работе приведено обобщение по основным видам взаимодействий частиц, показаны особенности данного подхода.

Реализованы дополнительные возможности в ускорительной версии комплекса МД, а также исследуется возможность применения различных гибридных вычислительных систем для решения задач молекулярной динамики.

В частности:

- выполнена модернизация функций, реализующих межчастичное взаимодействие;
- реализована возможность расчета взаимодействия для нескольких материалов;
- получены длительности выполнения на однопроцессорной персональной системе, специализированной компактной вычислительной системе ГВС-10 «Кубань», гибридной мультипроцессорной системе;
- выполнено сравнение с универсальными составляющими приведенных систем;
- проведено предварительное сравнение ускорителей на основе графических процессоров NVIDIA GT200 и GF100 на задачах молекулярной динамики.

## 1. Модернизация программы

### 1.1. Табулирование значений потенциалов и их производных

В предыдущих работах были представлены результаты разработки ускорительной версии программы расчета сил взаимодействия для парных, многочастичных ЕАМ и МЕАМ потенциалов в комплексе МД. Реализованные алгоритмы были узкоспециализированными, расчеты проводились для конкретных типов потенциалов: парный – Морзе, многочастичный ЕАМ – Ackland et al. и МЕАМ по модели Baskes et al. Для вычислений с другими

типами потенциалов программный код необходимо модифицировать, т. к. используется аналитический вид функций потенциала. При вводе новых модельных функций меняется арифметическая интенсивность программы, что требует проведение дополнительных исследований и настройки программы для оптимальной работы на арифметических ускорителях.

В комплексе МД используется метод табулирования значений потенциала и его производной, а при вычислении значений функции потенциала или его производной, конкретное значение получается интерполяцией табличных значений. Поэтому данный алгоритм адаптирован для работы на арифметических ускорителях. Это позволяет унифицировать работу программы для потенциалов различных видов и использовать библиотеку межчастичных потенциалов комплекса МД для расчетов на арифметических ускорителях.

При работе комплекса на гибридных вычислительных системах на универсальной части вызывается программа подготовки начальных данных, которая заполняет массивы данных параметрами задачи, строит начальную геометрию, вычисляет по аналитическим функциям значения потенциалов и их производных и заполняет массивы таблиц. Далее таблицы значений копируются в память ускорителей и используются во время работы молекулярно-динамического решателя.

Программы молекулярно-динамического решателя реализованные для выполнения на ускорительном сегменте переработаны в соответствии с использованием табличных значений потенциалов и их производных. Добавлены ускорительные функции интерполяции парных и многочастичных потенциалов. Переработана структура программы вычисления сил – для парных и многочастичных потенциалов ЕАМ разработан алгоритм распараллеливания на арифметических ускорителях по локальному списку частиц. Каждой частице ставится в соответствие номер ячейки в которой она находится и каждый поток ускорителя при обработке своей частицы производит перебор всех частиц в соответствующей ячейке, начиная с первой и по всем частицам из соседних ячеек. Это позволило отказаться от дорогостоящего списка соседей и использовать уже существующие в комплексе МД векторные массивы – цепочки связанных частиц.

## 1.2. Использование нескольких материалов

Первые версии программ комплекса МД для гибридных вычислительных систем обладали ограниченными возможностями, т. к. были рассчитаны на использование только одного типа материала и соответственно одного потенциала. В комплексе МД для универсальных вычислительных систем сущест-

вует возможность проведения расчетов с несколькими типами материалов одновременно и соответственно несколькими потенциалами. Разработка ускорительной версии программы, использующей табулированные значения потенциалов и их производных, позволила адаптировать ее для использования нескольких типов материалов в задаче и соответственно нескольких потенциалов.

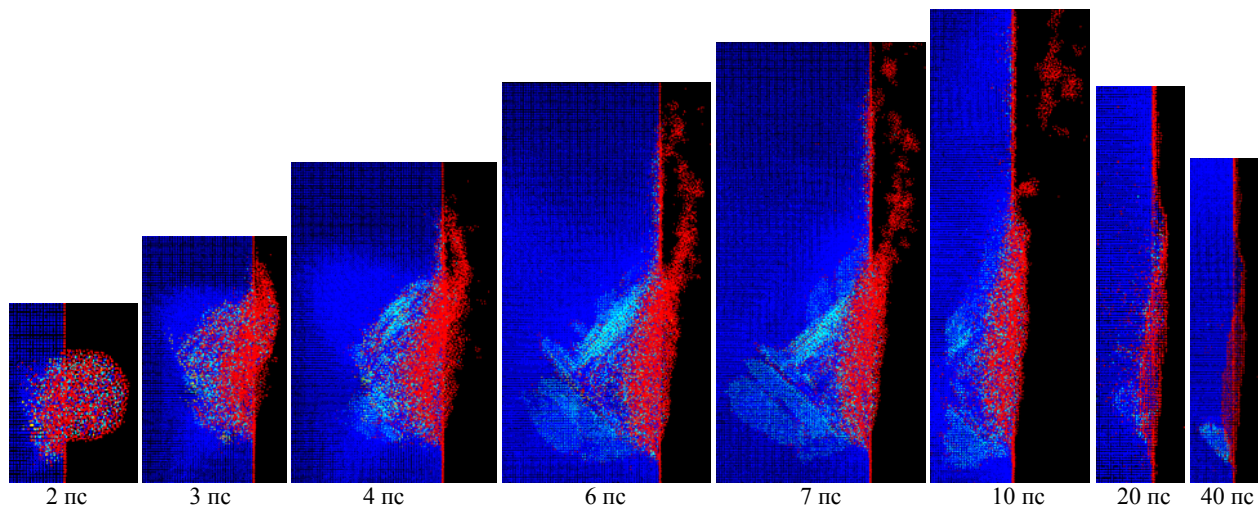


Рис. 1. Процесс взаимодействия капли с [100] мишенью при косом ударе  $60^\circ$  к нормали, скорость капли 5 км/с. Под картинками время в пс. Синим цветом помечены атомы, принадлежащие ОЦК решетке, циан соответствует ГПУ, желтый – ГЦК, красным цветом помечены атомы, принадлежащие к дефектным структурам

При использовании двух материалов в задаче для взаимодействия частиц одинакового и разного типа соответственно задается три потенциала. При этом задается таблица указателей на номер потенциала.

В программе подготовки начальных данных строится несколько таблиц по числу используемых потенциалов. Все таблицы копируются в память ускорителя и используются во время работы молекулярно-динамического решателя, реализованного для использования арифметических ускорителей. Добавлены ускорительные функции для интерполирования значений потенциалов и их производных с учетом типа взаимодействующих частиц.

Введенные изменения позволяют моделировать взаимодействие расплавленных металлических наночастиц с поверхностями ОЦК и ГЦК металлов[4]. Проведен расчет взаимодействия расплавленной капли меди (Cu) с поверхностью тантал (Ta) ОЦК (рис. 1).

## 1.3. Потенциал MEAM для сплава Pu-Ga

Программа расчета взаимодействия частиц для потенциала MEAM отличается от аналогичных программ для парных и многочастичных EAM потенциалов. В ней используется аналитический вид функций. Для сплавов используется несколько наборов параметров, причем для взаимодействия пары однотипных частиц применяется полный набор параметров, а для взаимодействия частиц разного типа используется набор параметров отвечающих за функции расчета экранировки и локальных электронных плотностей.

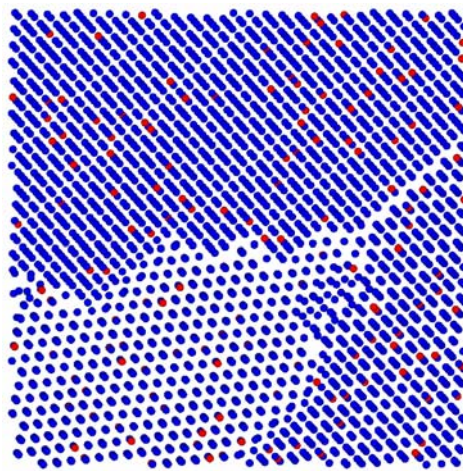


Рис. 2. Поликристаллический Pu-Ga (содержание Ga 5.2 %). Размер образца  $20 \times 20 \times 20$ , 10 зерен. Синим цветом помечены атомы Pu, красным – Ga

Все ускорительные функции MEAM потенциала были доработаны для использования частиц двух типов. В программу подготовки начальных данных добавлено копирование всех наборов параметров потенциалов, в программы расчета взаимодействия частиц добавлена ускорительная функция выбора типа взаимодействия и соответственно набора параметров. При этом набор ускорительных аналитических функций претерпел лишь небольшие изменения, связанные с добавлением нескольких дополнительных параметров – множителей.



Все изменения в алгоритмах и программах расчета взаимодействия с потенциалом MEAM позволяют проводить моделирование свойств и процессов в конструкционном материале – сплав Pu-Ga [3].

## 2. Результаты экспериментов

Исследования, представленные в отчете проведены на различных вычислительных системах:

- персональная вычислительная система с АрУ NVIDIA GTX260 и NVIDIA GTX470;
- специализированная компактная вычислительная система ГВС-10 «Кубань»;
- мультипроцессорная гибридная вычислительная система.

На каждой из перечисленных вычислительных систем выполнен расчет по комплексу МД в различных постановках (потенциалы Морзе, EAM, MEAM).

При проведении экспериментальных исследований задействованы различные арифметические ускорители:

- NVIDIA GTX260;
- NVIDIA GTX295;
- NVIDIA Tesla C1060;
- NVIDIA GTX470.

Спецификации АрУ приведены в таблице.

Для обобщения результаты экспериментов на различных арифметических ускорителях приведены на рис. 3–5. Также на рис. 6–8 даны ускорения, полученные при максимальном задействовании используемых вычислительных систем.

На рис. 3–5 представлены длительности выполнения вычислений полученные на различных ускорителях относительно одного ядра универсального процессора Intel Core i7 920 при использовании 1 MPI-процесса на задачах различных размеров для различных потенциалов.

Таблица 1

Спецификация арифметических ускорителей

Характеристики	NVIDIA GTX260	NVIDIA GTX295	NVIDIA Tesla C1060	NVIDIA GTX470
Тип GPU	GT200	GT200	GT200	GF100
Частота ядра, ГГц	1,296	1,24	1,3	1,22
Потоковых процессоров, шт.	192	480	240	448
Мультипроцессоров, шт.	24	60	30	14
Объем глобальной памяти, Мбайт	896	1792	4096	1280
Интерфейс	PCI-Express x16	PCI-Express x16	PCI-Express x16	PCI-Express x16

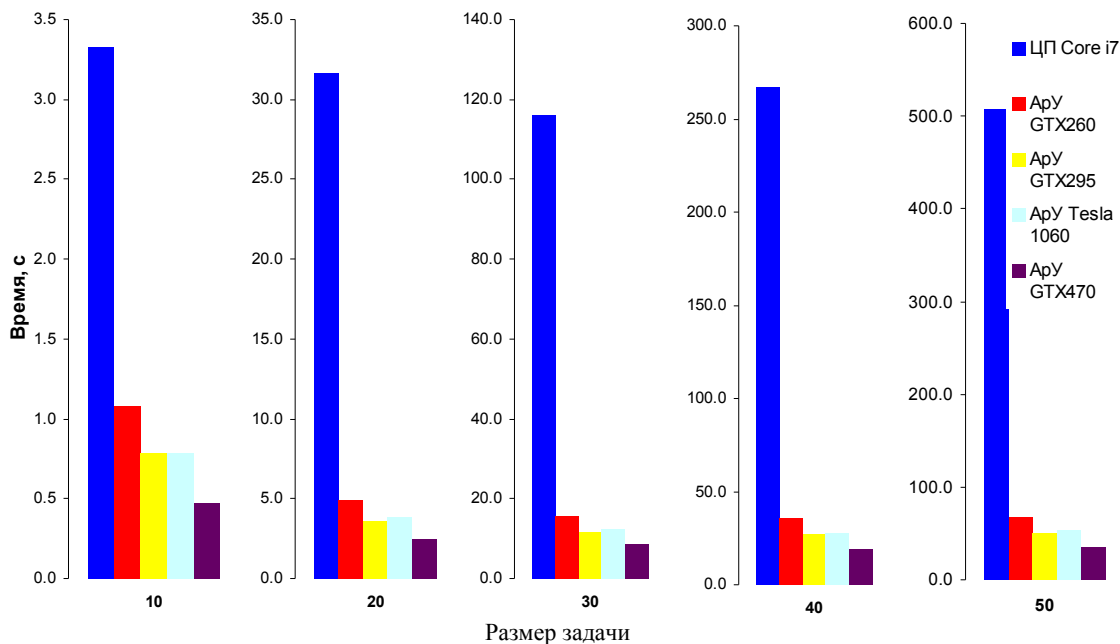


Рис. 3. Длительности вычислений по программе МД (потенциал Морзе, 1 MPI-процесс)

Ускорение, полученное на одном АрУ, составило от 3 до 14,5 раз по сравнению с одним ядром универсального процессора. Наибольшее ускорение получено на АрУ нового поколения NVIDIA GTX470.

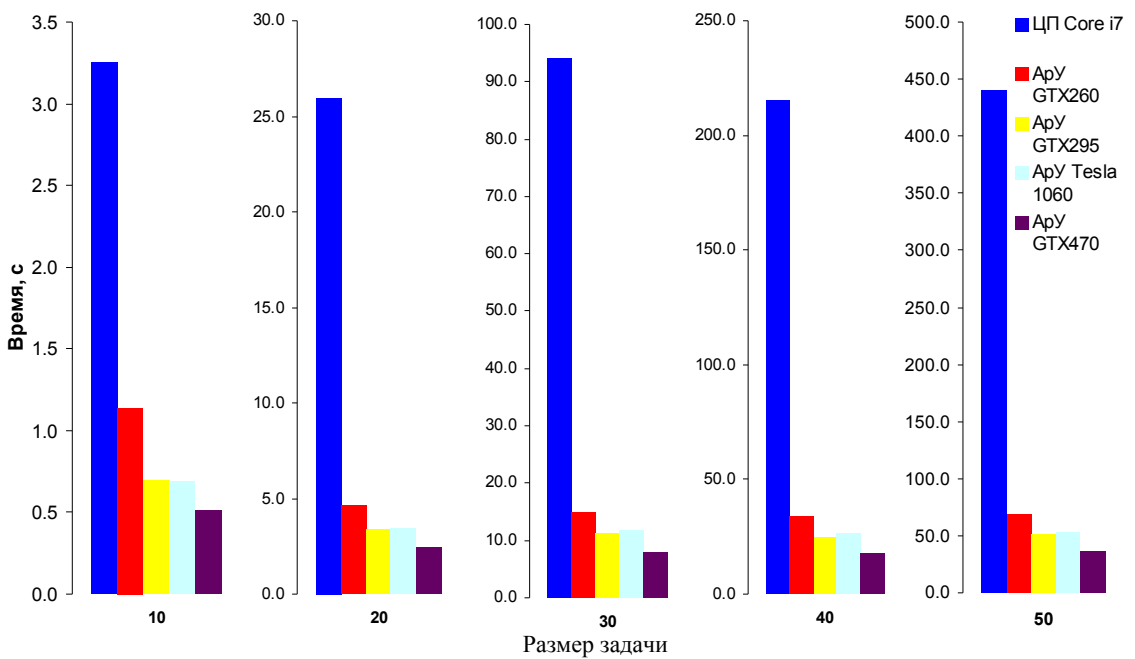


Рис. 4. Длительности вычислений по программе МД (потенциал ЕАМ, 1 MPI-процесс)

Ускорение, полученное на одном ApУ, составило от 2,8 до 12,1 раз по сравнению с одним ядром универсального процессора. Наибольшее ускорение получено на ApУ нового поколения NVIDIA GTX470 (от 1,45 до 1,9 раз больше чем другие ApУ).

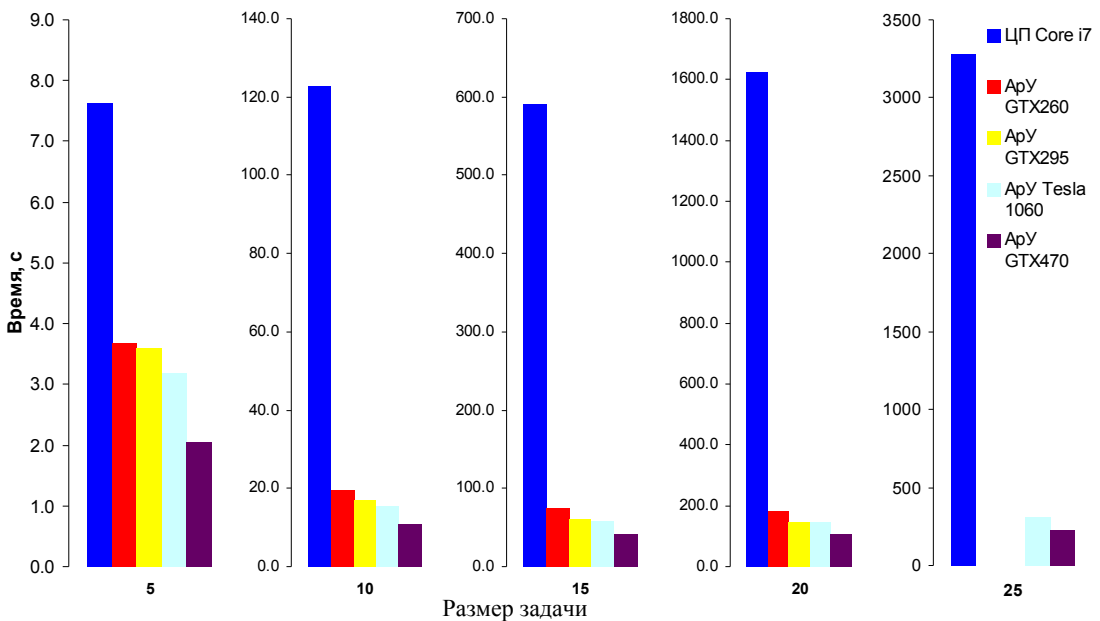


Рис. 5. Длительности вычислений по программе МД (потенциал MEAM, 1 MPI-процесс)

Ускорение, полученное на одном ApУ, составило от 2 до 15 раз по сравнению с одним ядром универсального процессора. Наибольшее ускорение получено на ApУ нового поколения NVIDIA GTX470 (от 1,35 до 1,7 раз больше чем другие ApУ).

На рис. 6–8 представлены ускорения, полученные при выполнении вычислений на ГВС-10 «Кубань» и мультипроцессорной системе на задачах различных размеров для различных потенциалов.

Для ГВС-10 «Кубань» максимально задействовано 8 MPI-процессов, при этом вычисления выполнялись на 4 ядрах универсального процессора и 8 арифметических ускорителях.

Для мультипроцессорной системы максимально задействовано 64 MPI-процесса, при этом вычисления выполнялись на 64 ядрах универсальных процессоров и 64 арифметических ускорителях.

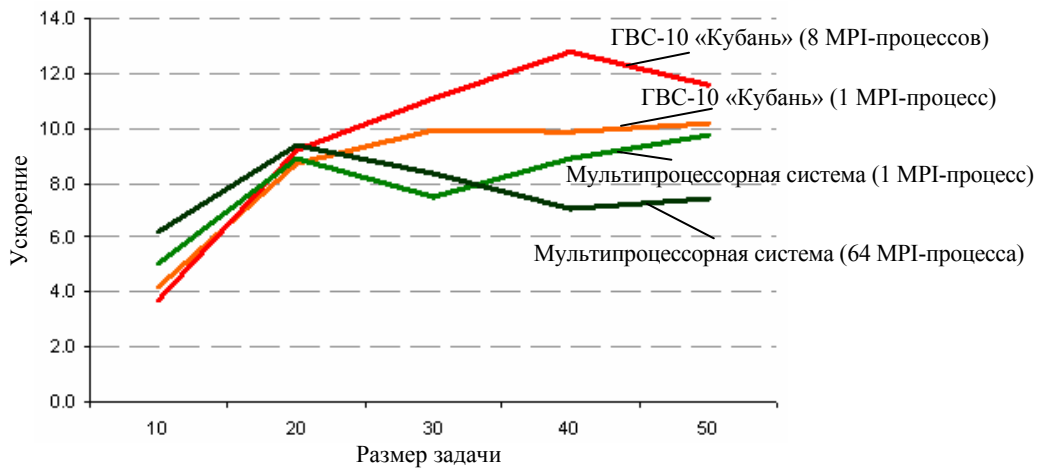


Рис. 6. Ускорение вычислений по программе МД (потенциал Морзе)

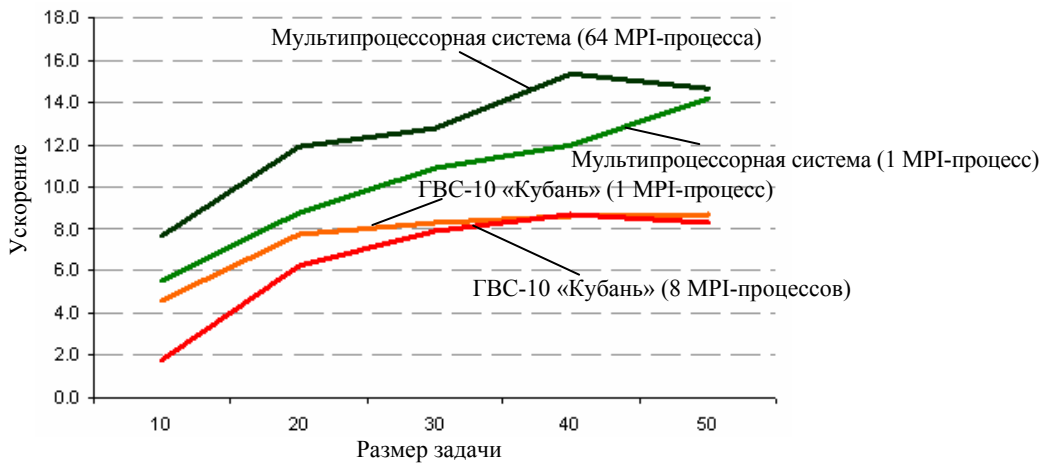


Рис. 7. Ускорение вычислений по программе МД (потенциал EAM)

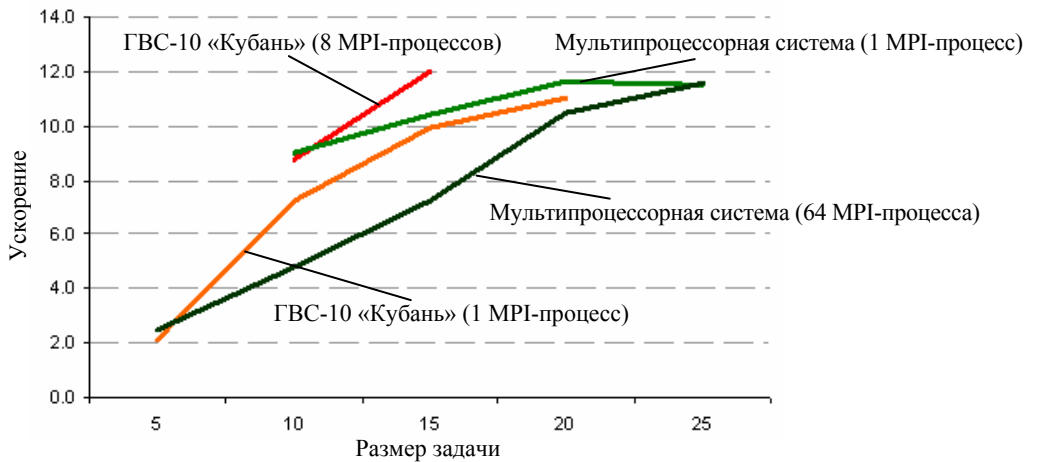


Рис. 8. Ускорение вычислений по программе МД (потенциал MEAM)

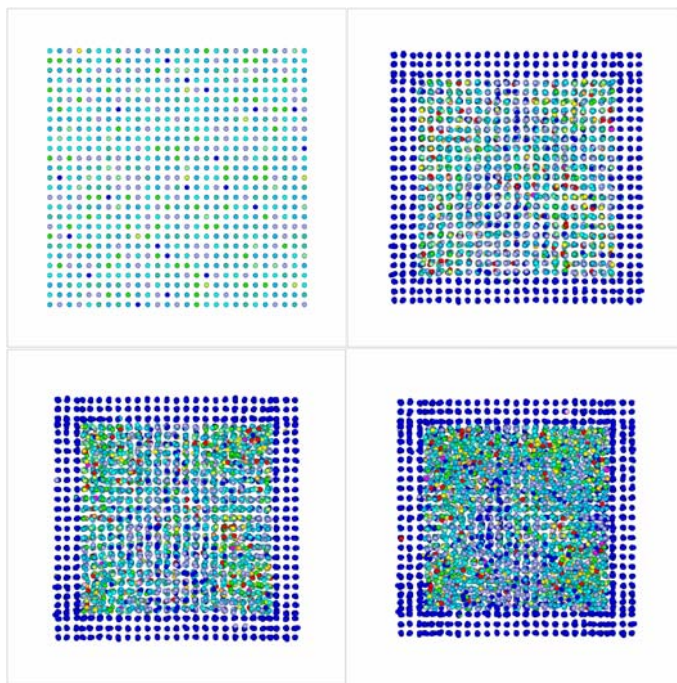


Рис. 9. Моделирование всестороннего сжатия монокристаллического образца Pu-Ga (содержание Ga 5,2 %)

Ускорение, полученное на обеих гибридных вычислительных системах, на одном и на максимальном количестве MPI-процессов отличается не более чем на 20 % на различных размерах задач для потенциалов Морзе, EAM и MEAM.

### 3. Перспективы

С применением графических ускорителей проведено моделирование всестороннего сжатия сплава Pu-Ga (рис. 9). Результаты получены в кратчайшие сроки, время моделирования составило около 5 суток, без применения ускорителей длительность выполнения возрастает на порядок и составит примерно 50 суток.

### Заключение

Реализованный в данной работе подход организации вычисления значений межчастичного взаимодействия позволяет производить производственные расчеты по всем основным типам потенциалов. Разработаны программы молекулярно-динамического решателя в соответствии с использованием табличных значений потенциалов и их производных для выполнения на АрУ. Добавлены ускорительные функции интерполяции парных и многочастичных потенциалов. Программы доработаны с учетом использования в расчетах нескольких материалов.

Все ускорительные функции MEAM потенциала были доработаны для использования частиц двух и более типов. При этом набор аналитических функ-

ций для ускорителя претерпел лишь небольшие изменения, связанные с добавлением нескольких дополнительных параметров – множителей.

Все эти изменения позволили провести расчеты получения холодных кривых для сплава Pu-Ga (актуально для моделирования упругопластических свойств конструкционных материалов).

В целом возможность применения в расчете нескольких материалов расширяет класс решаемых задач на ускорителях.

В работе получены длительности выполнения на различных гибридных вычислительных системах (однопроцессорной персональной системе, специализированной компактной вычислительной системе ГВС-10 «Кубань», гибридных мультипроцессорной системе). На каждой из приведенных систем получены значения ускорений, относительно универсальных составляющих.

Длительность вычислений уменьшена на однопроцессорной персональной системе по сравнению с одним ядром универсального процессора:

- потенциал Морзе – от 4 до 10 (АрУ NVIDIA GTX260) и от 9 до 19 раз (АрУ NVIDIA GTX470);
- потенциал EAM – от 4 до 9 (АрУ NVIDIA GTX260) и от 9 до 17 раз (АрУ NVIDIA GTX470);
- потенциал MEAM – от 3 до 14 (АрУ NVIDIA GTX260) и от 5 до 23 раз (АрУ NVIDIA GTX470).

Длительность вычислений уменьшена на ГВС-10 «Кубань» по сравнению с одним ядром универсального процессора:

- потенциал Морзе – от 4 до 10 раз;
- потенциал EAM – от 4 до 9 раз;
- потенциал MEAM – от 2 до 11 раз.

Длительность вычислений уменьшена на мультипроцессорной системе по сравнению с одним ядром универсального процессора:

- потенциал Морзе – от 5,1 до 9,7 раз;
- потенциал ЕАМ – от 5,6 до 14,2 раз;
- потенциал МЕАМ – от 9 до 11,6 раз.

Выполнены расчеты в многопроцессорном режиме, показано масштабирование ускорения на всех исследованных вычислительных системах.

Выполнено сравнение различных арифметических ускорителей, включая АрУ нового поколения NVIDIA GTX470. Полученные результаты позволяют рассчитывать на возможность эффективного использования арифметических ускорителей нового поколения для расчета задач молекулярной динамики.

## Литература

1. Воронин Б. Л., Ерофеев А. М., Копкин С. В., Крючков И. А., Рыбкин А. С., Степаненко С. А., Южаков В. В. Применение графических арифметических ускорителей для расчета задач молекулярной динамики по программному комплексу МД // Доклад.

X Международный семинар Супервычисления и Математическое Моделирование, Саров, 29.09 – 3.10, 2008 г.

2. Крючков И. А., Копкин С. В. Адаптация алгоритма расчета взаимодействия для многочастичного потенциала МЕАМ на гибридных вычислительных системах // Доклад. XI Международный семинар Супервычисления и Математическое Моделирование, Саров, 5–9 октября 2009 г.

3. Копкин С. В., Крючков И. А. Алгоритм модернизированного многочастичного потенциала для молекулярно-динамического моделирования на графическом арифметическом ускорителе // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2010. Вып. 3.

4. Коваленко Н. О., Воронин Б. Л., Копкин С. В., Грушин С. А., Кечин А. Г., Анисимов А. Н., Иоилев А. Г. и др. Молекулярно-динамическое моделирование взаимодействия расплавленных наночастиц с поверхностями металлов // Доклад. Международная научная конференция по проблемам физики высоких плотностей энергии «XII научные Харитоновские чтения», Саров, 19–23 апреля 2010 г.

# МЕТОДИКА С-007 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ, ЭЛЕКТРОНОВ, ПОЗИТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

*А. Г. Малькин, В. И. Рослов, А. Н. Залялов, А. В. Горбунов, Е. Н. Донской*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Для решения методом Монте-Карло систем связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов в математическом отделении ВНИИЭФ в 2007 году создана методика С-007. Она объединяет возможности двух основных методик предыдущего поколения – методики С-95 [1] и методики ЭЛИЗА [2]. Возможность моделировать рождение и перенос частиц всех четырех типов позволяет получить одно из главных новых качеств, которым обладает расчет, выполненный по методике С-007.

С-007 – многоцелевая методика. Она используется для решения различных задач переноса нейтронов и других ионизирующих излучений. Расчеты полей излучений и защиты от излучений; расчеты критических параметров систем ( $K_{эфф}$  и временной постоянной размножения нейтронов), в частности, параметров критических сборок; расчеты различных задач физики реакторов, в том числе, расчеты параметров импульсных исследовательских реакторов; расчеты задач, связанных с ядерной безопасностью; расчеты характеристик ускорителей электронов, выбор и оптимизация их мишеней; расчеты тока, заряда и поглощенной энергии в детекторах ионизирующих излучений при их облучении; обеспечение расчетами стадии разработки детекторов; расчеты функции отклика сцинтилляционных детекторов – это далеко не полный перечень расчетов, выполняемых с помощью этой методики.

Для решения перечисленных и других типов задач методика предоставляет широкие возможности детального описания сложной трехмерной геометрии систем. Методика позволяет использовать различные системы данных о сечениях реакций взаимодействия частиц с веществом, иначе говоря – различные системы констант переноса для моделирования траекторий частиц. В стандартном варианте для решения спектрального линейного интегро-дифференциального кинетического уравнения используются константы переноса с непрерывной зависимостью от энергии частиц. Для нейтронных задач методика позволяет работать с уравнением переноса в групповом приближении и использовать системы групповых констант переноса нейтронов.

Для описания постановки задачи и выбора конкретной схемы моделирования траекторий частиц (выбора тактики счета задачи) используется язык

задания, разработанный для методики С-95. В течение многих лет этот язык хорошо зарекомендовал себя и ныне просто дополнен с учетом возможностей новой методики.

Для реализации методики использован язык ФОРТРАН-90, а для выполнения параллельных вычислений на многопроцессорных ЭВМ – библиотека MPI.

Ниже дается представление о математической модели, в рамках которой задаются исходные данные задачи, и описаны некоторые особенности алгоритмов решения задач.

## 1. Геометрия

Геометрия задачи нередко представляет собой объект, который может быть разбит на части, обладающие определенной симметрией (например, осевой, сферической и т. п.). Такие части геометрии можно проще описать, если использовать присущие им геометрические особенности, а затем определенным образом скомпоновать отдельные подобъекты в единое целое. Такой подход к описанию геометрии позволяет уменьшить количество используемых символов во входной информации, и, кроме того, упрощаются алгоритмы и уменьшаются затраты времени ЭВМ на моделирование траекторий в тех частях системы, которые обладают геометрической простотой.

Основным объектом в задании геометрических данных является геометрический блок, который представляет собой совокупность областей, ограниченных поверхностями определенного типа. Различаются блоки следующих типов: плоский, сферический, осесимметричный, цилиндрический и трехмерный. Блоки последнего из указанных типов (в отличие от первых четырех) могут не обладать никаким видом пространственной симметрии, из чего и произошло название типа.

Блоки рассматриваются как независимые «строительные» элементы. Правильно размещенные друг относительно друга они составляют требуемую геометрию. В качестве исходного вместилища рассматривается мировое пространство (пустота), обладающее лишь системой координат (его можно рассматривать как всегда существующий блок 0-го уровня вложенности). В нем размещаются блоки (1-й уровень вложенности), которые, в свою очередь, могут содержать в себе другие блоки (2-й уровень), и так далее. Глубина вложений блоков, вообще говоря, не ограничена.

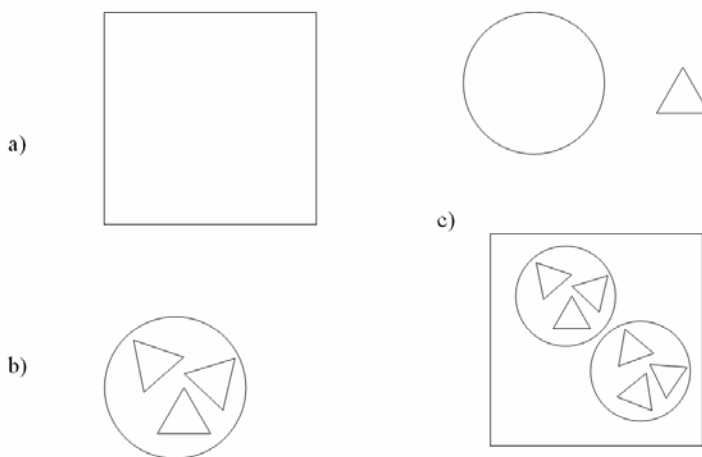


Иллюстрация возможностей построения геометрии посредством вложений

На рисунке схематично изображена геометрия, полученная из трех различных блоков (а): квадрат изображает блок 1 (внутренняя структура блоков не имеет значения), круг – блок 2 и треугольник – блок 3. На б представлен результат вложения 3-х экземпляров блока 3 в блок 2, причем каждое вложение имеет свою ориентацию. Наконец, фрагмент с показывает, что представляет собой геометрия в окончательном виде после 2-кратного вложения блока 2 в блок 1: блок 2 автоматически «тащит» с собой все, что в него было вложено.

Правильно заданная геометрия должна подчиняться требованию, чтобы размещенные блоки не пересекались между собой и не выходили за пределы блока-вместителя. Соблюдение этих условий является наиболее трудным при описании сложных геометрических объектов, так как надежные способы выполнения необходимой проверки не известны. Поэтому приходится особенно внимательно задавать информацию о размещении блоков, а тестирование геометрических данных осуществлять, главным образом, визуальным способом с помощью графической программы вывода сечений заданной геометрии произвольными плоскостями. Окончательное тестирование производится во время счета задачи, так как в алгоритм моделирования траекторий частиц введена проверка на соответствие такой фазовой координаты частицы, как номер области в блоке, фактическому пространственному положению частицы. Это позволяет вовремя остановить счет задачи с неверно заданной геометрией и внести необходимые изменения в постановку задачи.

## 2. Составы областей и константное обеспечение расчетов

Масса и изотопный состав каждой обладающей постоянной плотностью вещества области геометрического блока задаются на входном языке одним из следующих способов:

- заданием ядерных концентраций в единицах  $10^{24}/\text{см}^3$ ;
- заданием плотности и молекулярной формулы вещества в области;
- заданием плотности и весовых соотношений компонент вещества с описанием молекулярной формулы каждой из составляющих компонент вещества.

С заданием состава области связано понятие энергии «тепловых» нейтронов в области. В методике С-007 реализованы три модели расчета нейтронов, достигших в процессе блуждания в рассматриваемой области этой «тепловой» энергии.

Две первые модели служат для описания переноса нейтронов, термализовавшихся в данной области. В первой модели нейтрон, достигший тепловой энергии, в процессе дальнейшего блуждания в области имеет постоянную энергию и скорость, соответствующую тепловой энергии.

Вторая модель более аккуратно описывает процесс термализации и распространения термализовавшихся нейтронов. В модели свободного газа заданная «температура тепловых» является температурой в максвелловском распределении скоростей ядер вещества. Способ моделирования термализованных нейтронов в этой модели описан далее в параграфе 5 «Особенности моделирования траекторий различных частиц».

Третья модель носит название «без досчета тепловых». Она задается с помощью соответствующей тактики в области и означает, что по достижении нейтроном в процессе блуждания в рассматриваемой области энергии, меньшей «тепловой», происходит обрыв траектории («гибель нейтрона по энергии»). Эта модель используется при сравнении расчетных результатов с данными экспериментов, использующих пороговые датчики для измерений. Модель позволяет эффективно проводить расчеты методических и тестовых задач.

Для моделирования переноса нейтронов возможно использование следующих библиотек данных о сечениях: собственной библиотеки С-60 (описана



в работе [3]), библиотеки БАС-78 [4], а также библиотек ENDL-82 [5], ENDF/B-V[6], ENDF/B-VI [7], ENDF/B-VII [8].

Для моделирования процессов  $\gamma$ -образования используется библиотека NJMC, основанная на разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ данных по сечениям  $\gamma$ -образования для быстрых нейтронов и на библиотеках ENDL-82 и JENDL-3 для нейтронов с низкими энергиями, а также библиотеки  $\gamma$ -образования, основанные на указанных выше библиотеках для переноса нейтронов [5–8].

Для переноса гамма-квантов используется библиотека РИФ, сформированная на основе данных Сторма и Исраэля [9] и Вайгеля [10], а также библиотека EPDL97 [11].

Фотонейтронные данные сформированы на основе данных [12] и собраны в библиотеку FN.

Данные о нейтронно-ядерных реакциях, приводящих к образованию нестабильных изотопов, собраны в библиотеке активационных изотопов ACTIV. В настоящее время эта библиотека содержит сечения для 56 каналов активации на 31 изотопе и характеристики образующихся при этом 39 нестабильных изотопов.

Для переноса заряженных частиц – электронов и позитронов, используются данные библиотеки EEDL [13] и данные многочисленных литературных источников.

Для расчета релаксации атомных оболочек используются данные библиотеки EADL [14].

### 3. Источники частиц

Источник определяет значения стартовых параметров траекторий частиц. При решении связанных уравнений переноса источником вторичных частиц может быть один из каналов соответствующей реакции взаимодействия частицы с веществом среды. Естественно, в таком ветвящемся процессе стартовые параметры вторичных частиц определяются данными о сечениях реакций. По сути именно такой источник вторичных частиц определяет связь уравнений переноса различных типов частиц.

Другим видом является так называемый «независимый источник», то есть источник, задаваемый независимо от решения уравнений переноса. Стартовые параметры траектории частицы, выпущенной из независимого источника, определяются заданием пространственного, энергетического, углового и временного распределений. Входной язык методики С-007 предоставляет широкие возможности задания этих распределений для независимого источника – от дискретных распределений, в частности,  $\delta$ -распределений, до задания кусочно-непрерывных по фазовым координатам распределений с помощью таблиц и формул (изотропное или ламбертовское распределение по направлениям полета, максвелловское распределение по энергии и т. п.). Допускается

заданием нескольких таких источников с указанием их «долей» и «веса» испускаемых частиц. Выбор «долей» и «весов» для каждого источника определяется постановкой физической задачи и может варьироваться для повышения эффективности счета задачи в соответствии с априорной оценкой или по результатам прикидочных расчетов. Заметим, что методика позволяет в одном расчете получать результаты отдельно для каждого независимого источника. Это обеспечивается линейностью задачи и возможностью распределения рассчитываемых результатов (рассчитываемых функционалов) по номеру источника.

### 4. Рассчитываемые функционалы

Общий вид функционалов, рассчитываемых в методике С-007, следующий

$$\Psi(\Delta\vec{r}, \Delta\vec{E}, \Delta t) = \int_{\Delta\vec{r}} \int_{\Delta\vec{E}} \int_{\Delta t} \psi(\vec{r}, \vec{E}) f(\vec{r}, \vec{E}, t) d\vec{r} d\vec{E} dt.$$

Здесь  $f(\vec{r}, \vec{E}, t)$  – решение линейного нестационарного уравнения переноса, то есть плотность частиц на единицу объема фазового пространства в данный момент времени, фазовый объем  $\Delta x = (\Delta\vec{r}, \Delta\vec{E})$  – некоторое подмножество фазового пространства,  $\vec{r}$  – пространственные координаты частицы,  $\vec{E} = (E, \vec{\omega})$ ,  $E$  – энергия,  $\vec{\omega}$  – единичный вектор направления движения частицы, а  $\psi(\cdot)$  есть функция, которая определяется физическим смыслом вычисляемой величины. Если ввести следующие обозначения:

$\vec{v} = v\vec{\omega}$ , где  $v$  – модуль скорости частицы,

$\Sigma$  – макроскопическое сечение,

$\Sigma_a$  – сечение поглощения энергии,

то функция  $\psi$  принимает один из видов, представленных в таблице.

Вид функции  $\psi$

$\psi$	Рассчитываемый функционал
$v$	Поток
$E v$	Поток энергии
$\vec{v}$	Ток
$E \vec{v}$	Ток энергии
$\Sigma v$	Число столкновений
$E \Sigma_a v$	Поглощенная энергия
$I$	Плотность частиц
$E$	Плотность энергии

Фазовый объем, для которого ведется расчет значений функционала, в методике С-007 иначе называется детектором. Используются следующие типы детекторов: объемный, поверхностный, точечный по пространству и точечный по времени (для расчета

значения функционала в момент времени  $t$ ). Расчет функционала с использованием метода Монте–Карло происходит следующим образом [15]. Моделируется некоторое количество траекторий марковского процесса, связанного с уравнением переноса частиц, и в точках этих траекторий, принадлежащих детектору, то есть принадлежащих либо части объема данной области, либо участку данной поверхности, либо данной точке, вычисляются вклады в рассчитываемый результат. Среднее арифметическое сумм этих вкладов на множестве моделируемых траекторий и будет оценкой рассчитываемого функционала.

Оценка методом Монте–Карло величины вклада в рассчитываемый функционал для различных детекторов может быть получена различными способами. Перечислим эти способы и выпишем формулы для вычисления величины соответствующего вклада:

1) Оценка по пробегу (объемный детектор)

$$w \frac{\Psi(\cdot)}{v} l,$$

где  $w$  – весовая функция (вес) частицы, она может меняться либо на траектории частицы, либо в точках столкновений в зависимости от используемой методики построения траектории (дерева траекторий);  $l$  – длина отрезка траектории внутри детектора либо между двумя последовательными точками столкновений, либо между точкой столкновения и точкой пересечения траектории с границей детектора, либо между двумя точками пересечения траектории с границей детектора.

2) Оценка по столкновениям (объемный детектор)

$$w \frac{\Psi(\cdot)}{\Sigma v}.$$

3) Оценка по пересечениям (поверхностный детектор)

$$w \frac{\Psi(\cdot)}{v|\mu|},$$

где  $\mu$  – косинус угла между направлением полета частицы и нормалью к пересекаемой поверхности.

4) Оценка по достижению заданного значения времени

$$w \Psi(\cdot).$$

5) Оценка потока в точке (точечный детектор)

$$w \frac{\Psi(\cdot)}{v}.$$

Удобным способом описания детекторов конкретных результатов является расширение фазового пространства. К координатам фазового пространства, кроме переменных  $(\vec{r}, \vec{E})$ , относятся величины, связанные либо с источниками частиц: номер источника, энергия источника; величины, либо связанные с историей жизни частицы: номер столкновения, тип

частицы и многие другие. Заметим, что в расчетах с использованием метода Монте–Карло расширение фазового пространства не влияет на эффективность расчетов, что является одним из преимуществ использования данного метода. При вычислении конкретного функционала выделение области фазового пространства производится с помощью некоторых наборов  $\{\alpha_j\}$ , называемых параметрами. Основную часть используемых параметров составляют координаты физического фазового пространства  $(\vec{r}, \vec{E})$  и величины, определяемые как функции от этих координат. Это, например, декартовы координаты  $x, y, z$ , радиус-вектор  $R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$  и  $\mu = (z-z_0)/R$  – косинус угла в некоторой сферической системе координат, угол между направлением полета частицы и нормалью к поверхности, которую эта частица пересекает, энергия частицы и ряд других.

Если функционал  $\Psi(\cdot)$  необходимо вычислить для нескольких интервалов значений одного и того же параметра, мы называем такой результат дифференциальным и говорим, что задано распределение результата по этому параметру. Каждый из заказанных результатов, естественно, может вычисляться и без распределения по интервалам некоторых параметров, т. е. интегрально по таким параметрам.

Результат может быть распределен по нескольким параметрам и тогда он получается в виде матрицы такого количества измерений, сколько задано параметров, и протяженностью по каждому измерению, равному числу заданных интервалов соответствующего параметра.

## 5. Особенности моделирования траекторий различных частиц

Моделирование процессов переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов осуществляется с использованием аналоговой схемы [16] и методов повышения эффективности счета (см. ниже) в соответствии с выбранной системой сечений взаимодействия соответствующих частиц с веществом.

Для розыгрыша свободного пробега и выбора вещества, на котором происходит столкновение, используется схема максимальных кусочно-постоянных сечений [3, 17]. Учет теплового движения ядер среды осуществляется двумя способами: либо с учетом химических связей – так называемая модель  $S(\alpha, \beta)$ , либо в приближении свободного максвелловского газа [18]. При моделировании с учетом химических связей используются сечения взаимодействия и энерго-угловое распределение для заданной температуры.

При использовании модели свободного газа моделирование распространения нейтронов осуществляется на холодных сечениях вещества. Учет

температурного движения ядер заложен в сам алгоритм моделирования, что является очень удобным, так как не требует расчета констант для заданной температуры.

Образование  $\gamma$ -квантов происходит при каждом нейтронном столкновении по всем каналам  $\gamma$ -образования для вещества, на котором произошло столкновение.

Применение метода Монте–Карло к решению задач переноса электронов и позитронов затруднено характерными особенностями, присущими распространению заряженных частиц в веществе. Определяющим процессом взаимодействия электронов и позитронов с веществом является кулоновское взаимодействие. Оно характеризуется большой величиной сечения  $\sim 10^{-16} - 10^{-20} \text{ см}^2$  и сильной вытянутостью вперед индикатрисы рассеяния. Поэтому частица испытывает на своем пути такое большое число столкновений, что их прямое моделирование приводит в большинстве случаев к непомерно большим затратам машинного времени. Для борьбы с этой трудностью разработаны различные методы группировки столкновений [19–26]. Получающаяся при этом траектория движения частицы (в [22] ее называют вложенной траекторией) приближенно описывает истинную траекторию.

В методике С-007 для моделирования электронов и позитронов используются две схемы катастрофических столкновений [22] (схемы класса II по классификации Бергера [19]). В этих схемах к катастрофическим относятся столкновения с передачами энергии, большими некоторой пороговой энергии  $E_{cat}$ , и углами рассеяния, большими некоторого порогового угла  $\theta_{cat}$ . Катастрофические столкновения моделируются индивидуально. Моделирование отрезка траектории заряженной частицы между двумя последовательными катастрофическими столкновениями осуществляется с помощью одного из методов группировки столкновений (схемы класса I ( $I'$ ) по классификации Бергера [19]) (обычно без испускания вторичных частиц). Для моделирования некатастрофических столкновений в первой схеме методики С-007 используется метод группировки столкновений, основанный на приближении Фоккера–Планка [26], а во второй схеме – комбинация приближения Фоккера–Планка и непосредственного моделирования малоугловых столкновений. В обеих схемах для повышения точности моделирование траектории заряженных частиц вблизи границы раздела двух сред осуществляется по схеме индивидуальных столкновений, в которой моделируются все столкновения.

В методике С-007 для моделирования электронов и позитронов используется также схема индивидуальных (последовательных) столкновений. Реальная возможность использования схемы индивидуальных столкновений с прямым моделированием всех элементарных процессов взаимодействия электронов (позитронов) с веществом появилась в по-

следнее время в связи с бурным развитием вычислительной техники. Хотя методики, реализующие данную схему, требуют для расчетов довольно много времени, особенно при больших начальных энергиях частиц, результаты расчетов по этим методикам могут использоваться для верификации методик, использующих различные схемы группировки столкновений.

## 6. Методы повышения эффективности расчетов

Для повышения эффективности расчетов методом Монте-Карло применяется ряд методов уменьшения дисперсии [1–3, 27]. Одни из них довольно просты, другие весьма нетривиальны. Среди них можно выделить несколько классов.

*Методы обрыва траектории* относятся к самым простым способам ускорения расчетов. Они позволяют уменьшить количество вычислений за счет прекращения моделирования траектории частицы и применяются, если дальнейшее моделирование траектории не повлияет на вычисляемый результат. Эти методы применяются, в частности, в случаях, когда параметры траектории выходят за пределы определенной части фазового пространства. Например, к таким случаям относятся: гибель частицы по времени, гибель по энергии.

*Методы изменения количества ветвей* траектории в интересующей нас части пространства. К ним относятся, в первую очередь, расщепление и рулетка, когда в важных областях моделируется большее число траекторий с пропорционально уменьшенным весом, а в несущественных – меньшее число с увеличенным весом. К этим методам относится и весовое окно.

*Весовые методы модификации моделирования* позволяют увеличить количество вкладов в рассчитываемый результат от одной частицы. Любое случайное событие можно разыгрывать не по физическому, а по произвольному распределению, компенсируя это соответствующим изменением веса частицы. В таких методах, например, производится розыгрыш полета частицы в нужном направлении, или выбор других фазовых координат в желаемом диапазоне. Этот класс методов включает в себя экспоненциальное преобразование, вынужденные столкновения, розыгрыш испускания фотонов нейтронами.

*Метод пробных частиц* [3], представляет класс наиболее сложных методов уменьшения дисперсии, который применяется при вычислении потока частиц в малый объем пространства.

## Литература

1. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В., Донской Е. Н., Ельцов В. А., Иванов Н. В., Кибкало А. А., Моренко А. И., Моренко Л. З., Огнев С. П.,

- Ронжин А. Б., Рослов В. И., Семенова Т. В., Субботин А. Н., Трущина Е. Л. Программа C-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 3. С. 49–52.
2. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА для решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов. Вторая версия // VI Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов (г. Саров, 14–20 октября 2002 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. С. 93–99.
3. Донской Е. Н., Ельцов В. А., Житник А. К., Иванов Н. В., Кочубей Ю. К., Моренко А. И., Моренко Л. З., Рослов В. И., Ронжин А. Б., Субботин А. Н. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 2. С. 61–64.
4. Vasilyev A. P., Kuropatenko E. S., Lutov V. D., Orlov A. I. Nuclear Data Library – BAS. The history of development and validation for criticality safety calculation // ICNC 95. Proceeding of the International Conference of Nuclear Criticality Safety / Albuquerque, New Mexico, USA. September 17–21. 1995 P. 2.56–2.60.
5. Howerton R. J., Cullen D. E., Haight R. C., MacGregor M. H., Perkins S. T., Plechaty E. F. The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL): Evaluation Techniques, Reaction Index, and Descriptions of Individual Reactions // LLNL Report UCRL-50400. Vol. 15. Part A. Sept. 1975.
6. Kinsey R. Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File, ENDF // Brookhaven National Laboratory Report BNL-NCS-50496 (ENDF 102), 2<sup>nd</sup> Edition (ENDF/B-V). Oct. 1979.
7. McLane V., Dunford C. L., Rose P. F. ENDF-102. Data formats and procedures for the evaluated nuclear data file ENDF-6 // Upton, N.Y. 11973: National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, 1997.
8. Chadwick M. B., Oblozinsky P., Herman M. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology // Nuclear Data Sheets. V. 107. N 12. 2006. P. 2931–3060.
9. Storm E., Israel H. I. Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements  $Z = 1$  to  $Z = 100$  // Nucl. Data Tables. 1970. Vol. A7. P. 565–681.
10. Veigele W. J. Photon Cross Sections from 0.1 keV to 1 MeV for Elements  $Z = 1$  to  $Z = 94$  // Atomic Data Tables. 1973. Vol. 5. P. 51–111.
11. Cullen D. E., Hubbell J. H., Kissel L. EPDL97: the Evaluated Photon Data Library, '97 Version // Lawrence Livermore National Laboratory. Report UCRL-50400. Vol. 6. Rev. 5. Sept. 1997.
12. Библиотека фотонейтронных данных (<http://www-nds.iaea.org/photoneuclear>).
13. Cullen D. E., Perkins S. T., Seltzer S. M. Tables and Graphs of Electron Interaction Cross Sections Derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL),  $Z = 1–100$  // Lawrence Livermore National Laboratory. Report UCRL-50400. Vol. 31. November 1991.
14. Perkins S. T. et al. Tables and Graphs of Atomic Subshell and Relaxation Data Derived from the LLNL Evaluated Atomic Data Library (EADL) // Lawrence Livermore National Laboratory. Report UCRL-50400. Vol. 30. 1991.
15. Кочубей Ю. К. Статистическое моделирование кинетических процессов. Саров. 2004.
16. Бусленко Н. П., Голенко Д. И., Соболев И. М., Срагович В. Г., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). СМБ. М.: Физматгиз, 1962.
17. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982.
18. Иванов А. Н., Иванов Н. В. Учет теплового движения атомов среды при решении задач переноса нейтронов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 25–32.
19. Berger M. J. Monte Carlo Calculation of the Penetration and Diffusion of Fast Charged Particles // Methods in computational physics. New York–London: Academic Press. 1963. Vol. 1. P. 135–215.
20. Аккерман А. Ф., Никитушев Ю. М., Ботвин В. А. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: Наука, 1972.
21. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974.
22. Кольчужкин А. М., Учайкин В. В. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. М.: Атомиздат, 1978.
23. Аккерман А. Ф., Грудский М. Я., Смирнов В. В. Вторичное излучение из твердых тел под действием гамма-квантов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
24. Аккерман А. Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М.: Энергоатомиздат, 1991.
25. Bielajew A. F. Fundamentals of the Monte Carlo method for Neutral and Charged Particle Transport. Michigan, USA: The University of Michigan, 2000.
26. Иванов Н. В., Кочубей Ю. К. Применение приближения Фоккера-Планка для решения методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 1(9). С. 18–23.
27. Артемьева Е. В., Баканов В. В., Донской Е. Н., Ельцов В. А., Житник А. К., Залялов А. Н., Иванов Н. В., Огнев С. П., Ронжин А. Б., Рослов В. И., Семенова Т. В. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Вып. 13. С. 40–49. Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

# ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕТКИ И ПЕРЕСЧЕТ СЕТОЧНЫХ ВЕЛИЧИН В ДВУМЕРНЫХ РАСЧЕТАХ ПО МЕТОДИКЕ КОРОНА

А. М. Овчинников, А. Г. Козуб

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В 2008–2009 годах для методики КОРОНА [1] была выполнена программная реализация и проведена отработка единой для математических методик ИТМФ ВНИИЭФ технологии глобальной перестройки расчетной сетки с пересчетом сеточных величин на двумерных многообластных (многофрагментных) расчетах. По результатам этой работы был сделан доклад на конференции «Нижегородская сессия молодых ученых» в мае 2009. В общем виде (например, из нерегулярной методики ТИМ [2] в методику КОРОНА, или из методики КОРОНА в методику КОРОНА) эта технология представляет из себя последовательность действий, изображенную на рис. 1. Для выполнения этапов технологии используются несколько программных приложений, входящих в состав общего программного сервиса ИТМФ, таких как VisualEditor2D, SolidEditor, 2D-RND, InterVal [3].



Рис. 1. Общая схема глобальной перестройки

Выполнение всех этапов, изображенных на схеме в зависимости от задачи может занимать большое количество времени, в особенности, редактирование контуров в VisualEditor2D и задание начальных данных в SolidEditor (до недели кропотливого труда). Такие затраты, возможно, оправданы при передаче данных из одной математической методики в другую, но чрезмерны при проведении глобальной перестройки расчетной сетки в рамках одной методики.

## Построение пространственной сетки

При глобальной перестройке пространственной сетки в рамках только методики КОРОНА оказалось возможным заменить три первых звена из четырех (схема рис. 1) на более эффективное средство. А именно, проводить формирование дочерней задачи за один заход программными средствами самой методики КОРОНА с помощью приказов и ключевых слов. А на выходе получать уже готовый для пересчета величин программой InterVal разрез дочерней задачи.

С помощью набора ключевых слов и приказов методики КОРОНА возможно практически любое изменение сетки родительской задачи, а именно:

- изменение количества счетных фрагментов, математических подобластей;
- изменение количества и закона расстановки столбцов;
- изменение количества и закона расстановки строк;
- изменение контуров границ математических подобластей;
- добавление математических подобластей и пр.

Сами ключевые слова занимают малую часть управляющего файла задачи, и принцип их задания логически можно разделить на следующие уровни:

1-й уровень: Ничего не делается с фрагментами – ключевое слово для копирования фрагмента (UNCORR\_FR).

2-й уровень: Делается ли что-нибудь с опорной линией (расстановкой столбцов). Если делается, то на следующем уровне только ключевые слова для работы с математическими областями (CORR\_REG или CONTOUR\_GL). Для задания параметров опорной линии – специальное ключевое слово (PARTET).

3-й уровень: Если с границами области ничего не делается и количество точек не меняется – то область копируется (ключевое слово UNCORR\_REG). Если с границами области ничего не делается, а меняется только количество точек, или при изменении опорной линии, то ключевое слово CORR\_REG (с сохранением лагранжести или без). Если исправляется граница области (одна или две), то ключевое слово для описания нового контура (CONTOUR\_GL).

Пример фрагмента управляющего файла представлен на рис. 2.

```

UNCORR_REG 1 1 1 1
UNCORR_REG 1 2 1 2
UNCORR_REG 1 3 1 3

UNCORR_REG 2 1 2 1
UNCORR_REG 2 2 2 2
UNCORR_REG 2 3 2 3
UNCORR_REG 2 4 2 4
UNCORR_REG 2 5 2 5
UNCORR_REG 2 6 2 6
UNCORR_REG 2 7 2 7
UNCORR_REG 2 8 2 8

CORR_REG 3 1 3 2 0 0 0
CORR_REG 3 2 3 3 0 0 0
CORR_REG 3 3 3 4 0 0 0
CORR_REG 3 4 3 5 0 0 0
CORR_REG 3 5 3 6 0 0 0

CONTOUR_GL 3 1 70 1 1.0 1 1 3 1 2 201

PARTI 3 2 50 1.0 0.0000008 0.5 0.0 0 90
PARTI 3 1 100 1.0 0.5 0.0000008 -44.75 0.0000008 0
PARTI 3 2 50 1.0 0.0000008 -44.75 0.0 90 180

```

Рис. 2. Пример управляющего файла

Заданная информация обрабатывается транслятором методики, заводятся и размечаются сеточные и вспомогательные массивы для дочерней задачи, рассчитываются (при необходимости) параметры новых опорных линий (расстановка столбцов), рассчитываются (или копируются) радиусы точек на лучах. Радиусы точек сетки находятся путем определения точек пересечения дочернего луча с ломаной, определяющей границу математической области.

Задание и построение новой пространственной сетки при глобальной перестройке сетки в рамках только методики КОРОНА было реализовано в рамках методики в виде специального приказа и уже успешно применяется со второй половины 2009 года. Использование описанного и реализованного подхода к построению новой пространственной сетки позволило сократить календарное время выполнения глобальной перестройки расчетной сетки с пересчетом сеточных величин до 1 дня и менее.

### Одномерный пересчет величин по угловому направлению

Использование в методике КОРОНА, при расчете процессов газовой динамики, расщепления по пространственным направлениям позволяет сделать следующий шаг в направлении ускорения и повышения точности пересчета сеточных величин при некоторых типах глобальных перестроек сетки. Речь идет о перестройках сетки, при которых двумерный пересчет величин может быть сведен к совокупной последовательности одномерных пересчетов. В первую очередь это перестройки сетки, связанные только с изменением количества и/или закона расстановки столбцов (то есть с изменением параметров опорной линии). Потребность в такого рода перестройках в расчетах различного уровня стоит едва ли не на первом месте. Это перестройки типа прореживания (или увеличения количества) столбцов в некоторых участках счетных фрагментов, сдвиг центра сферического участка опорной линии и т.п. без изменения количества точек радиального направления. Поскольку положение строк сетки при таких перестройках не изменяется, а меняется для каждой стро-

ки только количество разбиений по угловому направлению, то целесообразно организовать пересчет сеточных величин по схеме, аналогичной используемой в методике КОРОНА при расчете углового этапа газовой динамики на этапе пересчета на эйлерову сетку, но только, возможно, с различным количеством угловых интервалов. Тем самым, для подобных перестроек сетки оказалось возможным обойти последнее звено единой схемы (рис. 1), а именно пересчет сеточных величин с помощью программы InterVal. В результате перестройка сетки и пересчет сеточных величин осуществляется внутри методики КОРОНА за один заход на ЭВМ.

При пересчете величин на начальном этапе формируются потоки объемов каналов родительской и дочерней задач.

$$S_i = S_{i-1} + Vol_i, \quad S_1 = 0, \quad (1)$$

где  $Vol_i$  – объем  $i$ -й ячейки.

Результирующий поток объемов получается путем наложения потока объемов родительской задачи на поток объемов дочерней задачи. Если в ячейку дочерней задачи попадает несколько компонент одного и того же вещества, то происходит объединение этих компонент.

Визуально принцип определения вклада ячеек родительской задачи в дочернюю показан на рис. 3. Здесь ячейки дочерней задачи пронумерованы индексами  $i$ , ячейки родительской задачи – индексами  $J_k$ , компоненты родительской задачи, попавшие в ячейку дочерней задачи – индексами  $j_n$ .

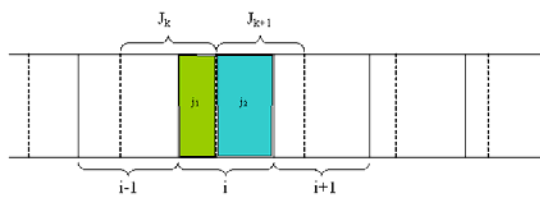


Рис. 3. Определение вклада ячеек родительской задачи в дочернюю

Плотности, удельные внутренние энергии и угловые скорости пересчитываются из условия соблюдения законов сохранения массы, внутренней энергии и импульса по следующим формулам:

$$Ros_i = \frac{\sum_{j=1}^n Ros_j Vol_j}{\sum_{j=1}^n Vol_j}; \quad Es_i = \frac{\sum_{j=1}^n Es_j m_j}{\sum_{j=1}^n m_j};$$

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n m_j V_j}{\sum_{j=1}^n m_j}. \quad (2)$$



Принцип пересчета радиальных и угловых скоростей при одномерном пересчете по угловому направлению описан далее при описании двумерных пересчетов величин.

Частным случаем одномерного пересчета по угловому направлению является сдвиг центра во фрагменте со сферической угловой сеткой. После программной реализации пересчет величин тестировался на различных модельных задачах. В качестве примера приведем результат применения программ на модельной задаче всплытия легкого «пузыря», постановка которой взята из [4], но несколько модифицирована. Кратко опишем постановку задачи. Сферическая легкая область заключена внутри также сферической, но тяжелой области, причем центры сфер, лежащие на оси симметрии, не совпадают между собой. На внешней границе тяжелого слоя навязано профилированное давление. В задаче [4] профиль навязанного давления был таков, что приводил к «всплыванию» легкой области относительно оси симметрии. Для нашего теста, мы несколько изменили профиль навязанного давления так, чтобы под воздействием градиента давления происходил сдвиг легкой области вдоль оси вращения.

Расчет в такой постановке был проведен до момента времени, когда правая граница центральной области практически наехала на неподвижный центр системы координат. В этот момент времени центр сферической угловой сетки был смещен ближе к левой границе области. На рис. 4 представлена пространственная сетка с закрасом по веществам в расчете до перестройки и после нее. Также показаны контуры математических под областей.

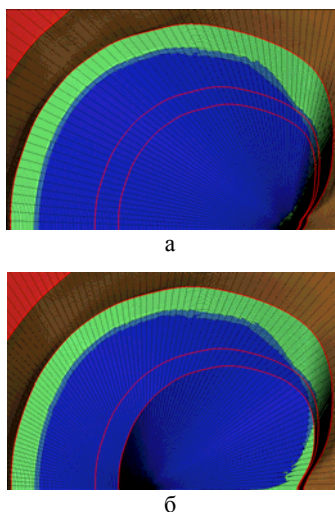


Рис. 4. Расчетная сетка: а – до сдвига; б – после сдвига

На рис. 5 представлены поля внутренних энергий и скоростей в расчете до и после перестройки сетки и пересчета сеточных величин. Каждая пара рисунков представлена в одинаковой палитре. Визуальный контроль показывает практическое совпадение этих величин. Более детальный анализ точности пересчета показывает, что масса по веществам и внутренняя энергия сохранены полностью, изменение в кинетической энергии не превышает 0,5 %.

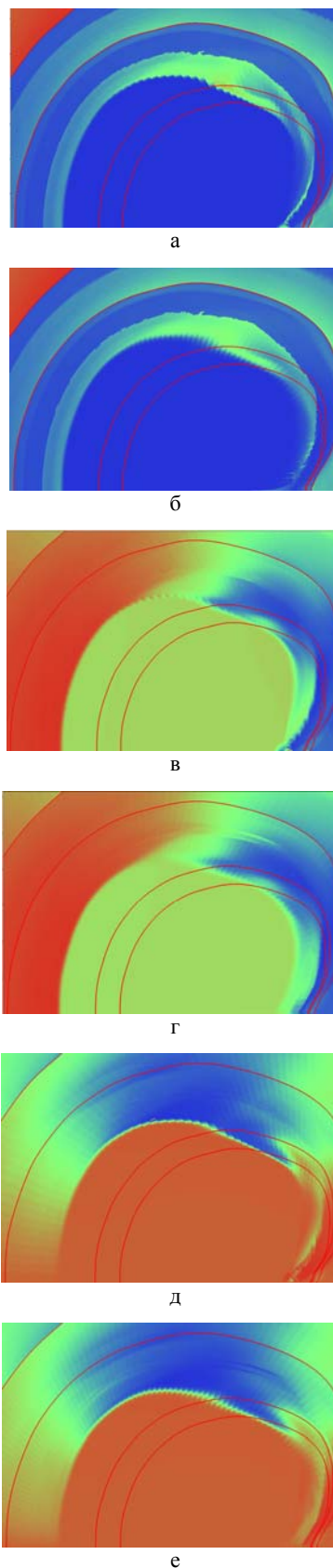


Рис. 5. Поля величин: а – удельные внутренние энергии до сдвига; б – энергии после пересчета; в – радиальные скорости до сдвига; г – радиальные скорости после пересчета; д – угловые скорости до сдвига; е – угловые скорости после пересчета



## Одномерный пересчет по радиальному направлению

При перестройках сетки, связанных только с изменением количества и расстановки точек радиального направления, также более точным является не чисто двумерный пересчет, а совокупность последовательности одномерных пересчетов вдоль каждого неизменного столбца (по аналогии с алгоритмами пересчета величин в программах интерполяции расчетной сетки в процессе счета по программам методики КОРОНА при неизменном количестве точек). Перестройки подобного рода (изменение числа точек по радиальному направлению в математических областях фрагментов, коррекция границ областей внутри счетных фрагментов) также весьма актуальны при проведении многообластных расчетов по методике КОРОНА.

Поэтому на следующем шаге в рамках методики КОРОНА был реализован собственный пересчет величин при глобальных перестройках сетки такого рода. Повышение точности такого пересчета связано с более аккуратным (по сравнению с двумерным пересчетом программой InterVal) учетом особенностей аппроксимации величин в методике КОРОНА.

При таком пересчете на начальном этапе формируются участки пересчета в родительской и дочерней задачах. В эти участки включаются диапазоны строк, внутри которых находятся пересчитываемые строки.

При одномерном пересчете по радиальному направлению вклад ячеек родительской задачи в ячейки дочерней задачи определяется по радиусам счетных ячеек сеток. Если в ячейку дочерней задачи попадает несколько компонент родительской задачи, то сортировка этих компонент в ячейке дочерней задачи производится по доле угла, образованного лучом из центра счетного фрагмента к центру компоненты. Визуально принцип определения вклада ячеек родительской задачи в дочернюю показан на рис. 6.

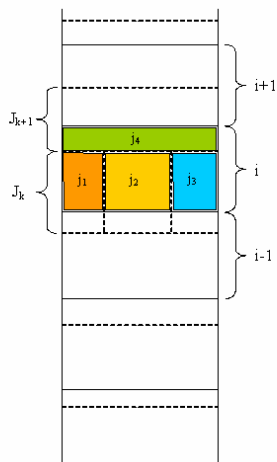


Рис. 6. Определение вклада ячеек родительской задачи в дочернюю

Плотности, энергии и радиальные скорости пересчитываются по тому же принципу что и в случае одномерного пересчета по углу по следующим формулам:

$$Ros_i = \frac{\sum_{j=1}^n Ros_j Vol_j}{\sum_{j=1}^n Vol_j}; \quad Es_i = \frac{\sum_{j=1}^n Es_j m_j}{\sum_{j=1}^n m_j};$$

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^n m_j U_j}{\sum_{j=1}^n m_j}. \quad (3)$$

После программной реализации описанный пересчет величин тестировался на различных модельных задачах. В качестве примера приведем результат применения программ на тесте о сходящейся цилиндрической ударной волне, постановка которого взята из [5]. Расчет начинался на равномерной пространственной сетке, приведенной на рис. 7.

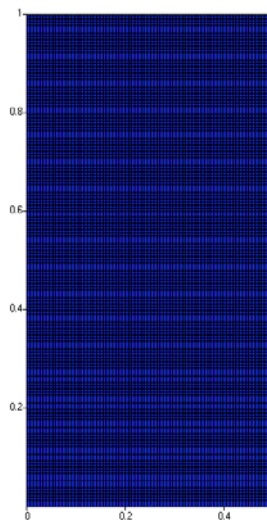


Рис. 7. Начальная пространственная сетка теста о сходящейся цилиндрической ударной волне

На момент времени  $t = 0,6$  в расчете было изменено количество точек радиального направления, при этом также была изменена их расстановка: за фронтом ударной волны сетка была прорежена, а перед фронтом – сгущена.

Ниже представлены используемые для этой перестройки ключевые слова:

```
PARTET 1 1 80 1.0 0.0 0.0000002 -0.5 0.0000002 0
CONTOUR_GL 1 1 120 1 1.0 1 1 1 80 2 79
CONTOUR_GL 1 2 30 1 1.0 1 1 1 222 2 79
```

На рис. 8 представлены поля плотностей в исходном расчете на момент перестройки сетки и в расчете с перестроенной сеткой после пересчета величин представляемыми программами.

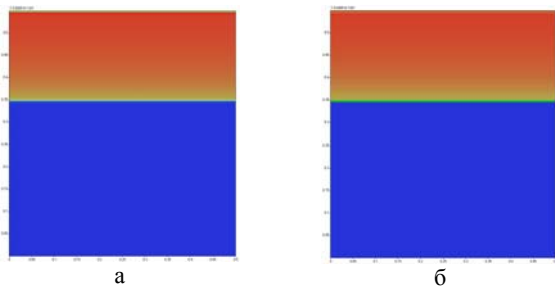


Рис. 8. Поля распределения плотностей: а – на исходной сетке; б – после пересчета

Визуальный контроль показывает практическое совпадение этих величин. Более детальный анализ точности пересчета показывает, что масса и внутренняя энергия полностью сохранены, изменение кинетической энергии менее 0,3 %. После перестройки сетки и пересчета величин расчет был продолжен. На рис. 9 приведены поля плотностей и энергий на момент времени  $t = 0,8$  полученные в расчете без перестройки сетки и в расчете после перестройки сетки и пересчета сеточных величин.

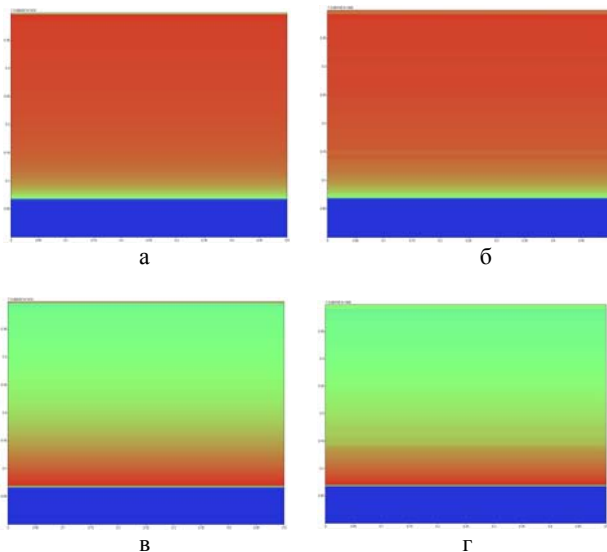


Рис. 9. Поля распределения величин: а – плотности на исходной сетке; б – плотности после пересчета; в – внутренняя энергия на исходной сетке; г – внутренняя энергия после пересчета

## Двумерный пересчет

На следующем шаге работы были разработаны алгоритмы и созданы программы в рамках методики КОРОНА для собственного двумерного пересчета при глобальной перестройке расчетной сетки. Причины заключаются в том, что при использовании единого пересчета программой InterVal имеем:

1. Необходимость вызова дополнительного приложения с предварительным формированием файлов ЕФР [6] «родительской» и «дочерней» задач.

2. Повторное задание уже в рамках InterVal соответствия областей при пересчете, копировании.

3. Дополнительный запуск в методике КОРОНА для восстановления давлений и температур по пересчитанным плотностям и энергиям.

А зачастую возникает необходимость всего лишь локально-глобального редактирования только границ счетных фрагментов с пересчетом величин только в прилегающих окрестностях задачи.

Для собственного двумерного пересчета в рамках методики КОРОНА был использован известный метод, основанный на нахождении площади многоугольника, являющегося общей частью при пересечении двух треугольников. Опишем кратко реализованные алгоритмы.

Родительская и дочерняя задачи разбиваются на блоки, для каждого из которых определены минимальные и максимальные координаты. В свою очередь, каждая из ячеек перестраиваемых областей делится на треугольники. Ищется геометрическое пересечение треугольников (рис. 10), находится площадь общей части и определяется вклад объемов, масс, энергий.

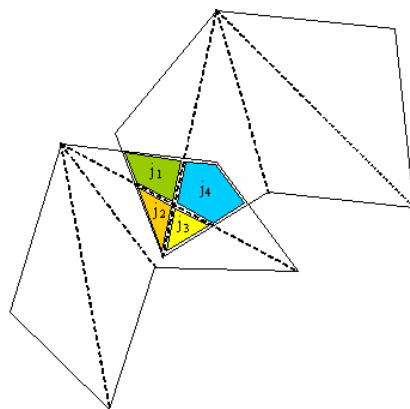


Рис. 10. Определение общей части пересечения двух ячеек

Вклады масс, энергий определяются из соответствующих законов сохранения:

$$Ros_i = \frac{\sum_{j=1}^n Ros_j Vol_j}{\sum_{j=1}^n Vol_j}; \quad Es_i = \frac{\sum_{j=1}^n Es_j m_j}{\sum_{j=1}^n m_j}, \quad (4)$$

где  $j$  – номер попавшей компоненты.

Пересчет скоростей выполняется по формулам (5)–(10). На рис. 11 показано центрирование радиальных  $U$  и угловых  $V$  скоростей в методике КОРОНА.

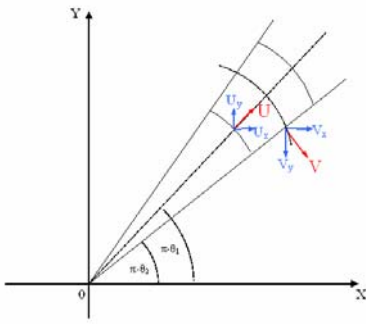


Рис. 11. Центрирование радиальных  $U$  и угловых  $V$  скоростей в методике КОРОНА

Пересчитывается импульс ячейки по направлениям, совпадающим с декартовыми осями

$$\begin{cases} U_x = U \cos(\pi - \theta_1) = -U \cos \theta_1, \\ U_y = U \sin(\pi - \theta_1) = U \sin \theta_1. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_x = V \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) = V \sin \theta_2, \\ V_y = V \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) = -V \cos \theta_2. \end{cases} \quad (6)$$

На завершающем этапе пересчета выполняется обратное преобразование, используя для него углы разворота  $\theta_{1n}$  и  $\theta_{2n}$  дочерней сетки:

$$\begin{cases} U_n = -U_x \cos \theta_{1n} + U_y \sin \theta_{1n}, \\ U' = U_x \sin \theta_{1n} - U_y \cos \theta_{1n}. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V' = -V_x \cos \theta_{2n} + V_y \sin \theta_{2n}, \\ V_n = V_x \sin \theta_{2n} - V_y \cos \theta_{2n}. \end{cases} \quad (8)$$

Окончательно формулы будут иметь вид:

$$U(i, j) = U_n + 0,25 \cdot (V'(i-1, j-1) + V'(i, j-1) + V'(i-1, j) + V'(i, j)), \quad (9)$$

$$V(i, j) = V_n + 0,25 \cdot (U'(i-1, j-1) + U'(i, j-1) + U'(i-1, j) + U'(i, j)). \quad (10)$$

Скорости по компонентам составных ячеек дочерней задачи распределяются с использованием линейной интерполяции.

В качестве модельной задачи для демонстрации работоспособности алгоритмов и программ, их реализующих, используем уже представленный тест о сходящейся цилиндрической ударной волне. Была выбрана начальная пространственная сетка, нестандартная для данного теста, но типичная для многих двумерных задач, расчеты которых проводятся в рамках методики КОРОНА. С подобной пространственной сеткой ранее тестировались программы двумерного пересчета сеточных величин при гло-

бальной перестройке расчетной сетки в методике РАЗЕС [4].

Геометрия задачи была разбита на три счетных фрагмента. Для первого фрагмента выбрана цилиндрическая сетка, для второго и третьего – сферическая. Начальная пространственная сетка и поле веществ задачи приведены на рис. 12 (закрас по порядковому номеру вещества).

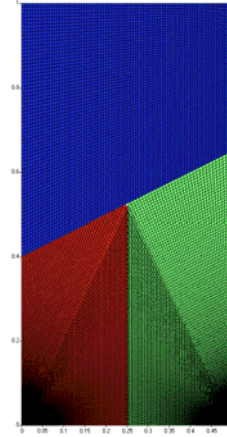


Рис. 12. Расчетная сетка и поле веществ задачи

По физической сути вещества в каждом счетном фрагменте одинаковы (идеальный газ), но имеют различные номера. Для проверки работоспособности программных компонент технологии на момент времени 0,3 была выполнена глобальная перестройка пространственной сетки, заключающаяся в переходе к однофрагментной постановке с приведением сетки к цилиндрическому виду. На рис. 13 приведены расчетные сетки родительской и дочерней задачи на момент перестройки.

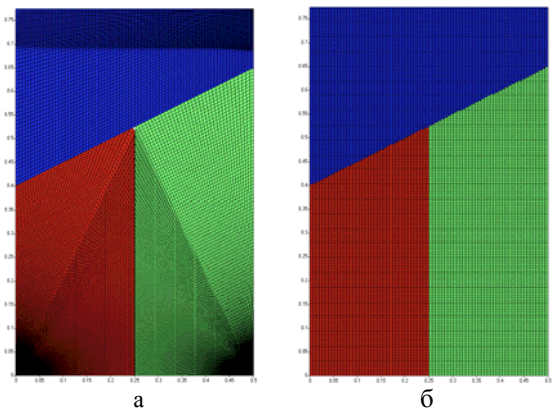


Рис. 13. Пространственная сетка расчета: а – до перестройки; б – после перестройки

На рис. 14 приведены поля плотностей, удельных внутренних энергий и скоростей «родительской» и «дочерней» задачи до и после пересчета сеточных величин (шкала, изображенная справа, одина для каждой пары рисунков).

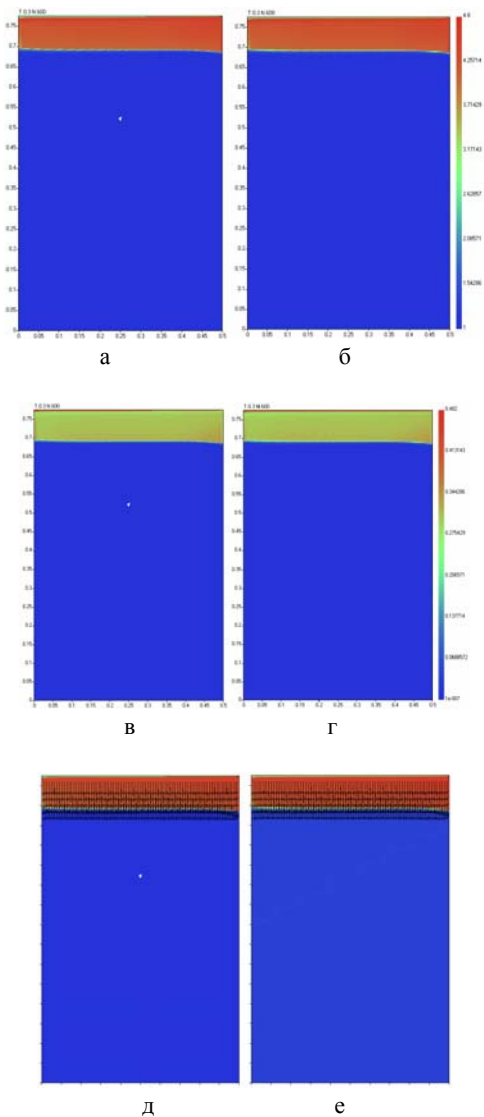


Рис. 14. Поля распределения величин: а – плотности на родительской сетке; б – плотности после пересчета; в – внутренняя энергия на родительской сетке; г – внутренняя энергия после пересчета; д – скорости на родительской сетке; е – скорости после пересчета

Из данных, приведенных на рис. 14, видно приемлемое качество пересчета величин как скалярных (плотности и внутренние энергии), так и векторных (скорости) величин. Анализ балансных величин показал практическое сохранение массы и энергии веществ: различия в массе не превышают 0,01 %, а в полной энергии – 0,1 %.

Отметим, что аналогичный пересчет был выполнен и единой программой InterVal. Отличия по полям

плотностей и энергий, полученные в пересчетах по двум различным программам не превышают 0,02 %. Времена ЦП, затрачиваемые на пересчет, практически совпадают и составляют около 5 мин ЦП Intel PentiumCore2Duo (2400 МГц). Однако, применение собственной программы потребовало значительно меньше временных затрат и действий со стороны исполнителя расчета, а следовательно сократило календарные сроки и повысило надежность (меньше вероятность внесения ошибки исполнителем).

## Литература

1. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29–43.
2. Скрыпник С. И., Рудько Н. М., Королев Р. А., Ляпин В. В., Попов А. В. Численное решение двумерных уравнений газовой динамики с теплопроводностью с использованием переменного по размеру разностного шаблона // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2007. Вып. 1. С. 14–26.
3. Черенков П. В., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Тарасов В. И., Олесницкая К. К., Баканова Т. Ю., Кузнецов М. Г., Шутов Д. А., Сергеева А. С. Технология подготовки в унифицированном виде начальных данных двумерных задач по программам SolidEditor и 2D-РНД // Вопросы атомной науки и техники. 2010. Вып. 1. С. 60–67.
4. Козуб А. Г., Пронина О. А. Глобальная перестройка расчетной сетки и пересчет величин в комплексе программ РАМЗЕС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 1. С. 55–61.
5. Бондаренко Ю. А., Воронин Б. Л., Делов В. И., Зубов Е. Н., Ковалев Н. П., Соколов С. С., Шемарулин В. Е. Описание системы тестов для двумерных газодинамических методик и программ. Ч. 1. Требования к тестам. Тесты 1-7 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1991. Вып. 2. С. 3–9.
6. Волгин А. В., Красов А. В., Кузнецов М. Ю., Тарасов В. И. Библиотека ЕФР для универсального представления расчетных данных // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. Вып. 11. С. 130–135.

# ОДНОМЕРНАЯ КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Д. В. Опасин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время актуальна проблема изучения воздействия радиационного излучения на работоспособность интегральных микросхем. В связи с этим было принято решение разработать модель, позволяющую исследовать воздействие различных типов излучения на работу полупроводниковых приборов. На первом этапе работ была создана одномерная модель кинетики электронов и дырок в полупроводниках. На данный момент в модель кинетики электронов и дырок были внесены следующие дополнения:

1. При расчете уравнения переноса зарядов используется разностная схема с коррекцией потоков.

2. Также при расчете уравнения переноса используется модель подвижности зарядов близкая к реальным зависимостям подвижностей от поля.

## Основные уравнения

Физические процессы в любом полупроводниковом приборе могут быть описаны системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\Delta\varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}(p - n + N_d - N_a); \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_n) = -R; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_p) = -R; \quad (3)$$

$$\vec{j}_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla\varphi; \quad (4)$$

$$\vec{j}_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla\varphi. \quad (5)$$

Здесь  $\varphi$  – потенциал электрического поля;  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $n, p$  – концентрация электронов и дырок;  $N_d, N_a$  – концентрации донорной и акцепторной примеси;  $j_n, j_p$  – плотности тока электронов и дырок;  $\mu_n, \mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $D_n, D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок.

Для последних справедливы соотношения:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{q}; \quad D_p = \frac{\mu_p kT}{q}, \quad (6)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Рассмотрим каждое уравнение более подробно.

## Решение уравнения Пуассона

Распределение потенциала электрического поля определяется с помощью уравнения Пуассона (1), которое можно записать в следующем виде:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}(p - n + N_d - N_a).$$

В начальный момент времени в области задается счетная сетка, фрагмент которой приведен на рис. 1.

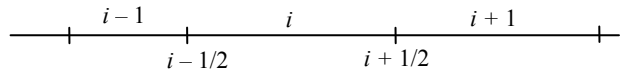


Рис. 1. Фрагмент счетной сетки

Уравнение Пуассона в разностном виде для ячейки с номером  $i$  записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x_i} (\nabla\varphi_{i+1/2} - \nabla\varphi_{i-1/2}) &= \\ &= -\frac{q}{\varepsilon_i \varepsilon_0} (p_i - n_i + N_{di} - N_{ai}). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ . Запишем более подробно уравнение (7) для случая, когда  $\varepsilon(x) \neq \text{const}$ . Рассмотрим ячейки с номерами  $i$  и  $i+1$ . Они имеют общий узел с номером  $i + 1/2$ . На границе ячеек справедливо соотношение

$$\varepsilon_i \left( \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)_i = \varepsilon_{i+1} \left( \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)_{i+1}. \quad (8)$$

Введем в рассмотрение величину  $\varphi_{i+1/2}$  – значение потенциала в соответствующем узле. Тогда выражение (8) можно записать в разностном виде:

$$\varepsilon_i \frac{\varphi_{i+1/2} - \varphi_i}{h_i} = \varepsilon_{i+1} \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i+1/2}}{h_{i+1}}. \quad (9)$$

Здесь  $h_i$  – расстояние от центра  $i$ -й ячейки до узла с номером  $i+1/2$ ,  $h_{i+1}$  – расстояние от центра  $(i+1)$ -й ячейки до узла с номером  $i+1/2$ . Из выражения (9) можно найти:

$$\varphi_{i+1/2} = \frac{\varepsilon_{i+1}h_i\varphi_{i+1} + \varepsilon_i h_{i+1}\varphi_i}{\varepsilon_i h_{i+1} + \varepsilon_{i+1}h_i}. \quad (10)$$

Тогда выражение соответствующего градиента в уравнении (7) для  $i$ -й ячейки имеет вид:

$$\nabla\varphi_{i+1/2} = \frac{\varphi_{i+1/2} - \varphi_i}{h_i}.$$

Подставляя (10), получим:

$$\nabla\varphi_{i+1/2} = \frac{\varepsilon_{i+1}(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{\varepsilon_i h_{i+1} + \varepsilon_{i+1}h_i}. \quad (11)$$

Аналогично, для ячеек с номерами  $i$  и  $i-1$ , введя в рассмотрение величины  $\varphi_{i-1/2}$  (значение потенциала в узле с номером  $i-1/2$ ) и  $h_{i-1}$  (расстояние от центра ячейки с номером  $i-1$  до узла с номером  $i-1/2$ ), имеем:

$$\nabla\varphi_{i-1/2} = \frac{\varphi_{i-1/2} - \varphi_{i-1}}{h_{i-1}} = \frac{\varepsilon_{i-1}(\varphi_i - \varphi_{i-1})}{\varepsilon_{i-1}h_i + \varepsilon_i h_{i-1}}. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) уравнение (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x_i} \left( \varepsilon_{i+1} \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\varepsilon_i h_{i+1} + \varepsilon_{i+1}h_i} - \varepsilon_{i-1} \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\varepsilon_{i-1}h_i + \varepsilon_i h_{i-1}} \right) = \\ = -\frac{q}{\varepsilon_i \varepsilon_0} (p_i - n_i + N_{di} - N_{ai}). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь  $i = 2, \dots, M-1$ , где  $M$  – общее количество ячеек сетки.

Полученная система разностных уравнений решается методом прогонки. По найденным значениям потенциала в ячейках, определяем значение напряженности электрического поля в узлах сетки следующим образом:

$$E_{i+1/2} = -\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h_i + h_{i+1}}.$$

### Уравнения непрерывности для электронов и дырок

Уравнения (2) и (3) являются уравнениями непрерывности для электронов и дырок. Уравнения (4) и (5) являются уравнениями для плотности токов электронов и дырок. Перепишем их с учетом, что  $E = -\nabla\varphi$ , в следующем виде:

$$\vec{j}_n = -q(-D_n \nabla n - n\mu_n \vec{E}),$$

$$\vec{j}_p = q(-D_p \nabla p + p\mu_p \vec{E}).$$

Введем следующие величины:  $\vec{U}_n = -\mu_n \vec{E}$  – скорость электронов;  $\vec{U}_p = \mu_p \vec{E}$  – скорость дырок. Тогда выражения для плотностей токов примут вид:

$$\vec{j}_n = -q(-D_n \nabla n + n\vec{U}_n),$$

$$\vec{j}_p = q(-D_p \nabla p + p\vec{U}_p).$$

Плотность тока электронов и дырок состоит из двух частей – плотности диффузионного тока и плотности дрейфового тока [2].

$$\vec{j}_n^{\text{диф}} = -q(-D_n \nabla n), \quad (14)$$

$$\vec{j}_p^{\text{диф}} = q(-D_p \nabla p), \quad (15)$$

$$\vec{j}_n^{\text{др}} = -qn\vec{U}_n, \quad (16)$$

$$\vec{j}_p^{\text{др}} = qp\vec{U}_p. \quad (17)$$

При решении уравнений непрерывности используется метод расщепления по процессам. Таким образом, уравнение непрерывности (2) для электронов можно заменить следующими уравнениями:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{div}(-D_n \nabla n), \quad (18)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{div}(-n\vec{U}_n), \quad (19)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -R. \quad (20)$$

Уравнение (18) описывает изменение концентрации электронов за счет диффузии. Уравнение (19) описывает изменение концентрации электронов за счет переноса под действием электрического поля. Уравнение (20) описывает изменение концентраций электронов за счет процесса рекомбинации. Уравнения диффузии и переноса для электронов и дырок имеют одинаковый вид. Запишем эти уравнения в разностном виде на примере электронов.

Уравнение диффузии (18) для ячейки счетной сетки с номером  $i$  запишем в следующем разностном виде:

$$\begin{aligned} \frac{n_i^{n+1} - n_i^n}{\Delta t} = \\ = \frac{1}{\Delta x_i} \left( D_{i-1/2} \frac{n_i^{n+1} - n_{i-1}^{n+1}}{h_{i-1/2}} - D_{i+1/2} \frac{n_{i+1}^{n+1} - n_i^{n+1}}{h_{i+1/2}} \right). \end{aligned}$$

Здесь  $\Delta t$  – шаг по времени;  $D$  – коэффициенты диффузии, которые предварительно рассчитываются в узлах счетной сетки;  $\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$  – расстояние между соседними узлами ячейки с номером  $i$ ;  $h_{i+1/2}$  – расстояние между центрами соседних ячеек с номерами  $i$  и  $i+1$ ;  $h_{i-1/2}$  – расстояние между цен-

трами соседних ячеек с номерами  $i$  и  $i-1$ . Полученная система разностных уравнений решается методом прогонки [3].

Для численного решения уравнения переноса (19) область расчета покрывается счетной сеткой. На рис. 2 приведен фрагмент счетной сетки. Разностная схема для уравнения переноса с коррекцией потоков строится следующим образом. В зависимости от направления скорости носителей заряда выбирается ячейка, которая отдает часть концентрации в соседнюю ячейку. Рассмотрим ячейку с номером  $i$  (рис. 2), предположим, что она «отдает» концентрацию как соседней ячейке с номером  $i+1$ , так и ячейке с номером  $i-1$ .

В разностном виде уравнение переноса для ячейки с номером  $i$  можно записать следующим образом:

$$\frac{n_i^{k+1} - n_i^k}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x_i} \left( n_{i+1/2}^{1/2} U_{i+1/2} - n_{i-1/2}^{k+1/2} U_{i-1/2} \right) = 0.$$

Здесь  $n_{i+1/2}^{k+1/2}$ ,  $n_{i-1/2}^{k+1/2}$  – потоковые функции через границы ячейки с номером  $i$ , определенные в соответствующих узлах сетки;  $\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ . Предположим, что внутри ячейки с номером  $i$  концентрация распределена линейно  $n_i = n_i(x)$  в зависимости от значений концентраций в соседних ячейках ( $n_{i-1}$ ,  $n_{i+1}$ ):

$$n_i(x) = \frac{\Delta n}{\Delta x_i} (x - x_i) + n_i^k,$$

$$\text{где } x_i = \frac{x_{i+1/2} + x_{i-1/2}}{2}.$$

Зная распределение концентрации в ячейке, можно записать выражения для потоков через ее границы. Поток через узел с номером  $i+1/2$  описывается выражением (21), поток через узел с номером  $i-1/2$  – выражением (22):

$$n_{i+1/2}^{k+1/2} = n_i^n + \frac{\Delta n}{2\Delta x_i} (\Delta x_i - U_{i+1/2} \Delta t), \quad (21)$$

$$n_{i-1/2}^{k+1/2} = n_i^n - \frac{\Delta n}{2\Delta x_i} (\Delta x_i - U_{i-1/2} \Delta t). \quad (22)$$

Значение величины  $\Delta n$  выбирается в зависимости от значения концентраций в соседних ячейках с помощью метода Superbee [4], а именно:

$$\Delta n = \text{MAXMOD} \left( \text{MINMOD} \left( 2\Delta n_{i+1/2}^k, \Delta n_{i-1/2}^k \right), \text{MINMOD} \left( \Delta n_{i+1/2}^k, 2\Delta n_{i-1/2}^k \right) \right).$$

Здесь  $\Delta n_{i+1/2}^k = n_{i+1}^k - n_i^k$ ,  $\Delta n_{i-1/2}^k = n_i^k - n_{i-1}^k$ ;

$$\text{MAXMOD}(x, y) = \text{sgn}(x) \max(|x|, |y|)$$

$$\text{MINMOD}(x, y) = \text{sgn}(x) \max\{0, \min(|x|, y \text{sgn}(x))\}.$$

С применением данного метода было проведено несколько тестовых расчетов, постановка и результаты двух из них приведены ниже.

В обоих расчетах решалось одномерное уравнение переноса  $\frac{\partial f}{\partial t} = -a \frac{\partial f}{\partial x}$ , в котором скорость полагалась  $a=1$ . Рассматривался промежуток  $0 \leq x \leq 10$ , который покрывался равномерной счетной сеткой, содержащей 100 ячеек.

В первом расчете в начальный момент времени был задан прямоугольный импульс в следующем виде:

$$f(x, 0) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 0,2; \\ 50, & 0,2 \leq x \leq 2,3; \\ 0, & 2,3 < x \leq 10. \end{cases}$$

В качестве граничных условий полагалось  $f(x=0, 10) = 0$ . На рис. 3 слева приведены результаты расчета, проведенного по схеме первого порядка и по схеме с применением коррекции потоков в сравнении с аналитическим решением через 100 счетных шагов.

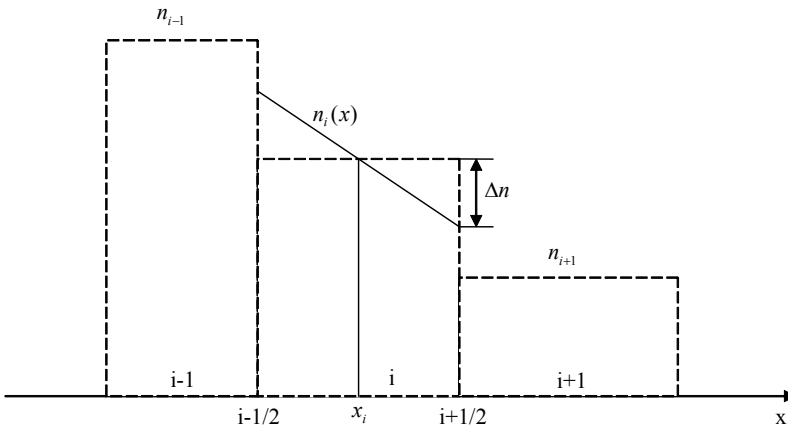


Рис. 2. Фрагмент сетки



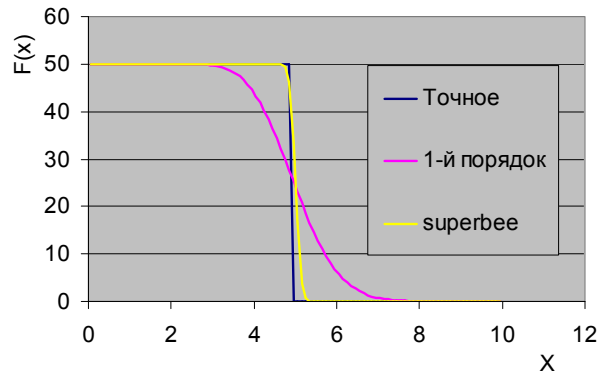
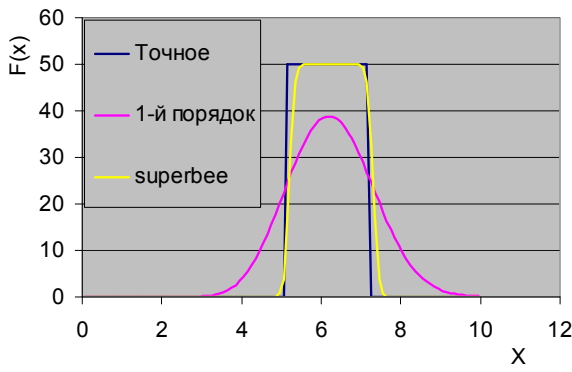


Рис. 3. Результаты тестовых расчетов

Во втором расчете  $f(x, t = 0) = 0$ ,  $f(x = 0) = 50$ . Результаты данного расчета через 100 счетных шагов приведены на рис. 3 справа в сравнении с аналитическим решением и решением, полученным при использовании схемы первого порядка аппроксимации.

Из приведенных графиков видно, что применение схемы первого порядка при расчете уравнения переноса приводит к сильной численной диффузии, которая проявляется в виде размазывания фронтов. С помощью коррекции потоков удалось заметно снизить эффект численной диффузии и более точно описать профили.

### Модель подвижности электронов и дырок

В уравнения переноса электронов и дырок входят их скорости, которые описываются следующими выражениями:

$$U_n = -\mu_n E \text{ — скорость электронов;}$$

$$U_p = \mu_p E \text{ — скорость дырок.}$$

Здесь  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижности электронов и дырок соответственно. В реальности скорости электронов и дырок зависят от напряженности электрического поля нелинейно. Этот факт существенно влияет на плотность дрейфового тока. Напомним, что плотности тока дрейфа электронов и дырок описываются следующими выражениями:

$j_n^{\text{дрейф}} = -qnU_n$  — плотность дрейфового тока электронов;

$j_p^{\text{дрейф}} = qpU_p$  — плотность дрейфового тока дырок.

В связи с этим возникла необходимость ввести модели подвижностей электронов и дырок, зависящие от напряженности электрического поля. Рассмотрим следующую модель подвижностей электронов и дырок [5]:

$$\mu(E) = \frac{\mu_0}{\left(1 + \left[\frac{\mu_0 E}{U_\alpha}\right]^\beta\right)^{1/\beta}}. \quad (23)$$

Здесь  $\mu_0$  — подвижность частиц при отсутствии электрического поля;  $\beta = 2$  для электронов,  $\beta = 1$  для дырок;  $U_\alpha = \frac{U_{\max}}{1 + 0,8e^{T/600}}$ ;  $U_{\max} = 1,1 \cdot 10^7$  см/с для электронов,  $U_{\max} = 9,5 \cdot 10^6$  см/с для дырок;  $T$  — температура.

На рис. 4 слева приведены зависимости подвижности электронов и дырок от напряженности электрического поля при следующих значениях параметров:  $\mu_{0n} = 800 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ,  $\mu_{0p} = 300 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ,  $T = 300$  К. Справа приведены зависимости скоростей электронов и дырок от напряженности электрического поля.

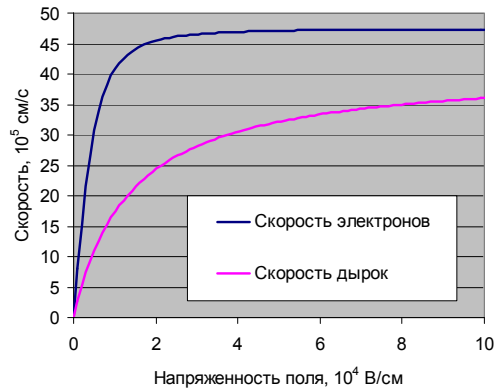
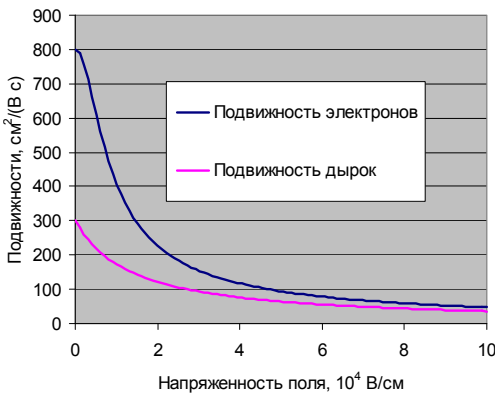


Рис. 4. Зависимости подвижности и скорости электронов и дырок от напряженности электрического поля

Из приведенных графиков видно, что значения скорости электронов и дырок возрастают с увеличением напряженности электрического поля до определенного значения, затем выходят на насыщение, что соответствует реальности.

### Граничные условия

Для решения уравнения Пуассона и уравнений дрейфа электронов и дырок необходимо задать гра-

$$\begin{cases} \frac{(np)_i^{n+1} - (np)_i^n}{\Delta t} = -\left(np_i^{n+1} - n_{ie}^2\right) \left( A_n n_i^n + A_p p_i^n + \frac{1}{\tau_n(p_i^n + n_{ie}) + \tau_p(n_i^n + n_{ie})} \right) \left( n_i^n + p_i^n \right); \\ p_i^{n+1} - n_i^{n+1} = p_i^n - n_i^n. \end{cases}$$

ничные условия. Рассмотрим граничные условия – условия в виде омических контактов. При этих условиях поверхностный потенциал и концентрации электронов и дырок фиксированы на границах. Считается, что на поверхности квазипотенциалы Ферми основных и неосновных носителей совпадают и равны приложенному смещению на рассматриваемом электроде, т. е.  $\phi_n = \phi_p = V_{applied}$ .

Потенциал  $\phi$  фиксируется на уровне, согласованном с равенством нулю заряда, т. е.  $p - n + N_d - N_a = 0$ . Одновременно должно выполняться условие  $np = n_{ie}^2$ . Из этих двух соотношений находятся значения концентраций электронов и дырок на границе. Величину электростатического потенциала находим по одной из двух нижеприведенных формул:

$$\begin{aligned} \phi &= V_{applied} + \frac{kT}{q} \ln \frac{n}{n_{ie}}, \\ \phi &= V_{applied} - \frac{kT}{q} \ln \frac{p}{n_{ie}}. \end{aligned}$$

### Рекомбинация

Используя найденные значения, вычислим изменение концентраций за счет процесса рекомбинации. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = -R; \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -R. \end{cases}$$

Данная система уравнений эквивалентна системе:

$$\begin{cases} \frac{\partial(np)}{\partial t} = -R(n+p); \\ \frac{\partial(p-n)}{\partial t} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Рекомбинационный член имеет вид [4]:

$$R = (np - n_i^2) \left( A_n n + A_p p + \frac{1}{\tau_n(p + n_{ie}) + \tau_p(n + n_{ie})} \right).$$

Здесь,  $A_n, A_p$  – некоторые постоянные;  $\tau_n, \tau_p$  – времена жизни электронов и дырок;  $n_{ie}$  – собственная концентрация носителей.

В разностном виде систему уравнений (21) для ячейки с номером  $i$  можно записать следующим образом:

Введем следующие обозначения:

$$C_i = \left( A_n n_i^n + A_p p_i^n + \frac{1}{\tau_n(p_i^n + n_{ie}) + \tau_p(n_i^n + n_{ie})} \right) \times (n_i^n + p_i^n).$$

Тогда получим:

$$\begin{cases} (np)_i^{n+1} = \frac{(np)_i^n + n_{ie}^2 \Delta t C_i}{1 + \Delta t C_i}; \\ p_i^{n+1} - n_i^{n+1} = p_i^n - n_i^n. \end{cases}$$

Обозначив  $\frac{(np)_i^n + n_{ie}^2 \Delta t C_i}{1 + \Delta t C_i} = \alpha_i$  и  $p_i^n - n_i^n = \beta_i$ ,

получим

$$\begin{cases} n_i^{n+1} p_i^{n+1} = \alpha_i; \\ p_i^{n+1} - n_i^{n+1} = \beta_i. \end{cases}$$

Отсюда, учитывая условие положительности концентраций, получим:

$$\begin{cases} p_i^{n+1} = -\frac{\beta_i}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\beta_i^2 + 4\alpha_i}; \\ n_i^{n+1} = p_i^{n+1} + \beta_i. \end{cases}$$

### Получение вольт-амперных характеристик

С целью получения вольт-амперных характеристик была проведена серия расчетов. Во всех расчетах рассматривается  $p$ - $n$  переход. Задан промежуток, содержащий область с полупроводником  $n$ -типа ( $0 \leq x \leq 2$  мкм) и область с полупроводником  $p$ -типа ( $2 \leq x \leq 4$  мкм) как показано на рис. 3.1. Данный промежуток покрывается равномерной счетной сеткой, содержащей 500 ячеек.

n	p
---	---

Рис. 5. Область расчета

Заданы следующие параметры среды [2]. Диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon = 11,7$ ; подвижности электронов и дырок  $\mu_n = \mu_p = 500 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ; собственная концентрация носителей заряда  $n_{ie} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ; абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_0 = 8,85 \text{ Ф/м}$ ; постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ; заряд электрона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ; концентрация донорной и акцепторной примеси:

$$N_d(x) = \begin{cases} 10^{16} \text{ см}^{-3}, & 0 \leq x < 2 \text{ мкм}; \\ 0, & 2 \leq x < 4 \text{ мкм}; \end{cases}$$

$$N_a(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 2 \text{ мкм}; \\ 10^{16} \text{ см}^{-3}, & 2 \leq x < 4 \text{ мкм}. \end{cases}$$

Таким образом рассматривается *p-n* переход.

Заданы следующие начальные данные. Концентрации электронов и дырок:

$$n(x) = \begin{cases} 10^{16} \text{ см}^{-3}, & 0 \leq x < 2 \text{ мкм}; \\ 10^4 \text{ см}^{-3}, & 2 \leq x < 4 \text{ мкм}; \end{cases}$$

$$p(x) = \begin{cases} 10^4 \text{ см}^{-3}, & 0 \leq x < 2 \text{ мкм}; \\ 10^{16} \text{ см}^{-3}, & 2 \leq x < 4 \text{ мкм}. \end{cases}$$

Значения концентраций электронов и дырок на границах промежутка определяются из условий:

$$\begin{cases} p - n + N_d - N_a = 0, \\ pn = n_i^2. \end{cases}$$

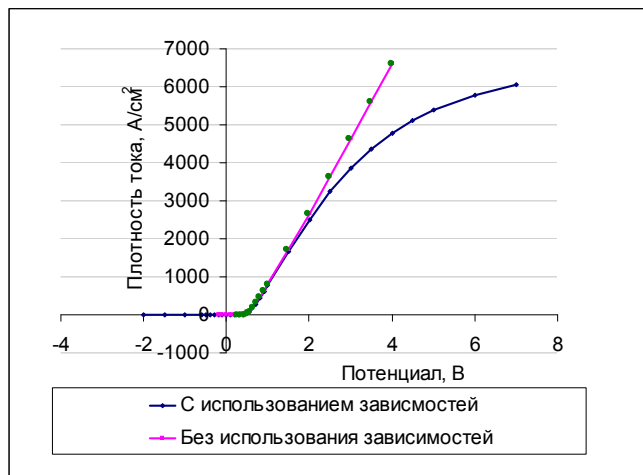


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики

На левом конце промежутка значение потенциала равно 0 В.

Все расчеты отличаются друг от друга значением потенциала на правой границе.

На рис. 6 приведены вольт-амперные характеристики. Сиреневая линия соответствует вольт-амперной характеристике, полученной с помощью расчетов, в которых значения подвижностей электронов и дырок полагались постоянными. Синяя линия соответствует вольт-амперной характеристике, полученной с помощью расчетов, в которых применялась модель зависимости подвижности электронов и дырок от напряженности электрического поля (23).

В литературе [2] для описания вольт-амперных характеристик используется следующее уравнение:

$$U = \varphi_T \ln \left[ \left( \frac{I}{I_0} \right) + 1 \right] + I r_{\delta}. \text{ На рис. 6 зелеными точками отмечено поведение данной зависимости при следующих значениях параметров:}$$

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = 2,5875 \cdot 10^{-2} \text{ В } (T = 300 \text{ К}),$$

$$I_0 = 2,741592 \cdot 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{см}^2},$$

$$r_{\delta} = 5,11625 \cdot 10^{-4} \frac{\text{В} \cdot \text{см}^2}{\text{А}}$$

при  $S = 1 \text{ мкм}^2 = 10^{-8} \text{ см}^2$ ,  $r_{\delta} = 51 \text{ кОм}$ .

При малых токах сказывается влияние члена уравнения, содержащего логарифм. Такой ситуации соответствует нижний загиб линий графиков, приведенных на рис. 6 (область  $\varphi_{\text{прав.}} < 0,6 \text{ В}$ ). С увеличением тока преобладает линейный член уравнения (линейный участок линий графика). Из приведенного рис. 6 видно, что выход на насыщение вольт-амперной характеристики происходит только за счет зависимости подвижностей электронов и дырок от напряженности электрического поля.

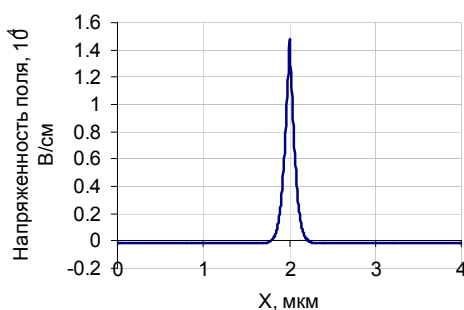
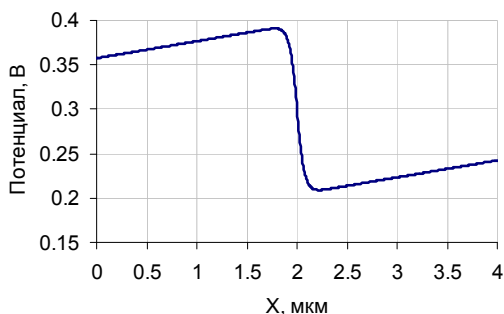


Рис. 7. Значения потенциала (слева) и напряженности электрического поля (справа) при значении потенциала на правом конце 0,6 В

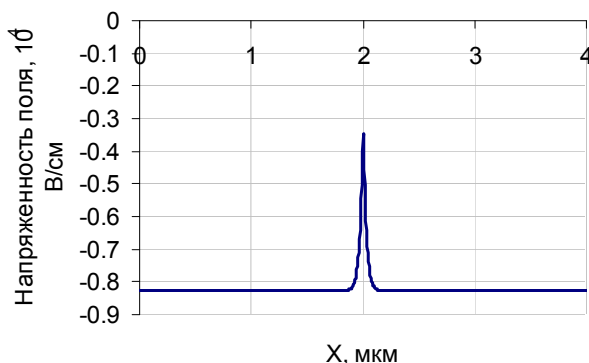
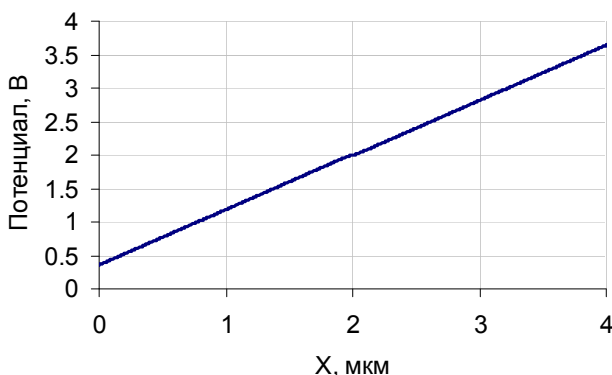


Рис. 8. Значения потенциала (слева) и напряженности электрического поля (справа) при значении потенциала на правом конце 4 В

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов при значении потенциала на правом конце равным 0,6 В и 4 В соответственно.

Из рисунков видно, что при малых значениях потенциала на правом конце промежутка основное падение напряжения происходит на  $p$ - $n$  переходе (в окрестности точки  $x = 2$  мкм, рис. 7). При более высоких значениях приложенного потенциала основное падение напряжения происходит не на переходе, в  $p$  и  $n$  областях ( $0 \leq x < 2$  мкм и  $2 < x \leq 4$  мкм, рис. 8).

### Заключение

В результате проделанной работы создана базовая программа для расчета кинетики неравновесных носителей заряда в полупроводниках в одномерной постановке. С помощью данной программы можно считать нестационарные задачи, а также исследовать физические процессы в различных полупроводниковых системах. При расчете уравнений переноса носителей заряда используется разностная схема с коррекцией потоков, что позволило существенно уменьшить эффект численной диффузии. Также вве-

дена модель зависимости подвижностей зарядов от поля близкая к реальным процессам, с помощью чего удалось обеспечить выход на насыщение вольт-амперных характеристик.

### Литература

1. McGraw-Hill: Microelectronic devices and circuits [electronic resource] Copyright by Clifton G. Fonstad. Mode of access: <http://creativecommons.org>. 2006. P. 66–67.
2. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника. М.: Высш. шк. 1991.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
4. Roe P. L., Pike J. (1984) Efficient construction and utilization of approximate Riemann solutions, in Computing methods in applied Sciences and Engineering, VI (Proc. 6th Int. Symp. on Comput. meth. in Appl. Sci. and Eng., Versailles, France, Dec. 12–16, 1983). P. 499–518, North Holland, Amsterdam.
5. McGraw-Hill: Microelectronic devices and circuits [electronic resource] Copyright by Clifton G. Fonstad. Mode of access: <http://creativecommons.org>. 2006. P. 116–121.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИБЛИОТЕК SCOTCH И METIS ДЛЯ ДЕКОМПОЗИЦИИ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК В МЕТОДИКЕ «ТИМ»

Т. Н. Половникова, А. А. Воропинов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Методика ТИМ предназначена для решения двумерных и трехмерных задач механики сплошной среды на неструктурированных сетках. Работа посвящена использованию библиотек SCOTCH и MeTiS для декомпозиции неструктурированных сеток для обеспечения проведения расчетов в режиме мелкозернистого распараллеливания в методике ТИМ [1, 2]. Интерес к библиотеке SCOTCH обусловлен высоким качеством получаемых декомпозиций, возможностью использовать распараллеливание в модели общей и распределенной памяти.

## Введение

Для повышения точности проводимых расчетов и более адекватного решения сложных задач необходимо производить численное моделирование на сетках с большим количеством ячеек (счетных точек). Проведение расчетов с большим количеством счетных точек требует значительного календарного времени. Один из путей сокращения сроков – проведение расчетов в параллельном режиме счета.

Эффективное исполнение счетных программ на параллельных машинах с распределенной памятью требует декомпозиции данных по процессам таким образом, чтобы распределение вычислительной нагрузки по процессам было равномерным, а количество обменов минимальным. Для сеточных методик задача декомпозиции, как правило, решается путем геометрического разделения области решения на фрагменты вдоль линий сетки. При этом требуется получение таких фрагментов, чтобы время расчета каждого из них было примерно одинаково. Это и является задачей декомпозиции. Получение качественной декомпозиции является актуальной проблемой, особенно для методик, использующих неструктурированные сетки.

Декомпозиция – задача равномерного распределения вычислений между процессорами, причем количество обменов (взаимодействий) между процессорами было минимальным.

Один из методов декомпозиции основан на разрезании графа на подграфы. В качестве исходных данных используется граф, отображающий структуру сетки.

В докладе приводятся декомпозиции, полученные с помощью библиотек SCOTCH [3] и MeTiS [4] в методике ТИМ. В качестве исходных данных

для библиотек используется граф, отображающий структуру сетки.

Библиотеки SCOTCH и MeTiS – это две свободные распространяемые библиотеки, реализующие этот метод:

- французская библиотека SCOTCH, разрабатываемая в университете Бордо, использует в качестве основного метода декомпозиции – многоуровневый диффузионный метод;

- американская библиотека MeTiS, разрабатываемая в университете Миннесоты, использует в качестве основного метода декомпозиции – метод многоуровневой декомпозиции по  $k$  направлениям.

Декомпозиции выполнялись на ряде типичных сеток методики ТИМ: в двумерном случае на четырехугольной, шестиугольной сетках и диаграмме Вороного, в трехмерном случае на шестигранной, восьмигранной сетках и диаграмме Вороного на сетках примерно в 1 млн ячеек.

Качество декомпозиции определяли с помощью следующих критериев качества:

1. Разбалансировка – отношение максимального количества точек ( $A_{\max}$ ) на процессоре к среднему ( $A_{\text{ср}}$ ). Коэффициент разбалансировки:

$$K = \left( \frac{A_{\max}}{A_{\text{ср}}} - 1 \right) \times 100\% .$$

2. Отношение количества разрезанных ребер ( $L_{\text{разр}}$ ) между компактами (что соответствует обмену информации между соответствующими процессорами) к общему количеству ребер графа  $L_{\text{общ}}$ :

$$L = \frac{L_{\text{разр}}}{L_{\text{общ}}} \times 100\% .$$

Разрезанное ребро – ребро, соединяющее две вершины из разных компактов.

## 1. Декомпозиция в двумерном случае

В двумерном случае декомпозиция выполнялась на четырехугольной, шестиугольной сетках и сетке диаграммы Вороного (рис. 1):

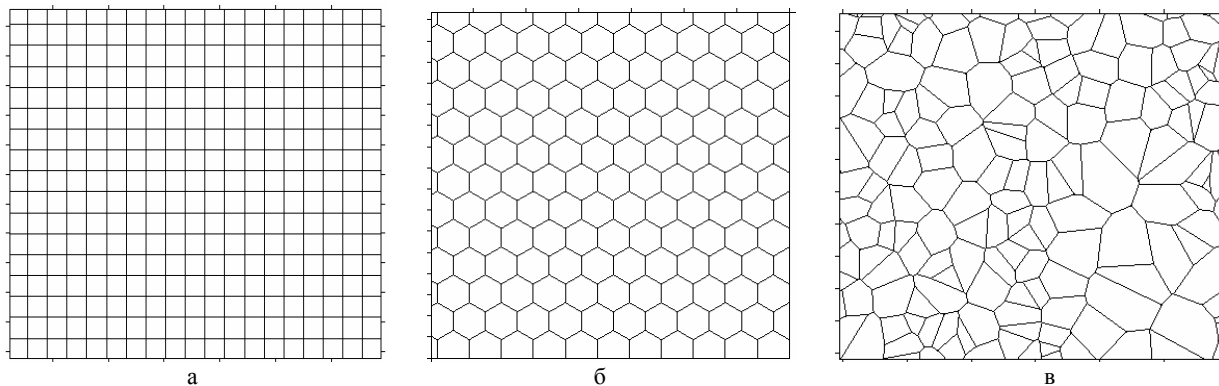


Рис. 1. Фрагменты сеток для тестирования декомпозиций: а – четырехугольная сетка; б – шестиугольная сетка; в – сетка диаграммы Вороного

Декомпозиции строились в основном на сетках примерно в 1 млн ячеек (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика использованных сеток

Тип сетки	Количество ячеек	Количество ребер	Количество узлов
Четырехугольная	1000000	2002000	1002001
Шестиугольная	1000500	3001501	2001002
Диаграмма Вороного	1000867	3002602	2001736

В двумерном случае коэффициенты разбалансировки при декомпозиции на разное количество компактов представлено в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты разбалансировки в зависимости от числа компактов

Количество компактов	Коэффициент разбалансировки SCOTCH	Коэффициент разбалансировки MeTiS
12	1,7 %	0,0 %
16	2 %	0,001 %
24	2,8 %	0,004 %
25	3,7 %	0,002 %
64	2,6 %	0,001 %
65	3,4 %	0,004 %
99	2,6 %	0,019 %
100	2,7 %	0,010 %
200	3 %	0,030 %
201	4,1 %	0,028 %
512	2,1 %	0,046 %
1024	3,2 %	0,097 %
2048	3,9 %	0,302 %

Декомпозиция с помощью библиотеки MeTiS выполнялась через три разные процедуры: METIS\_PartGraphRecursive, METIS\_PartGraphKway, METIS\_PartGraphVKway. В результате получали три различных варианта декомпозиций (рис. 2).

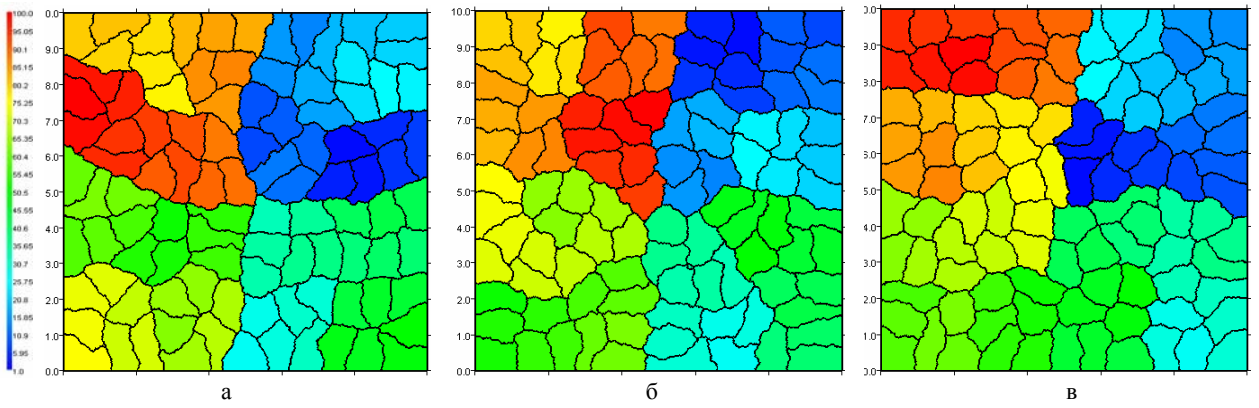


Рис. 2. Декомпозиция на 100 компактов сетки диаграммы Вороного через библиотеку совместности с MeTiS по различным процедурам: а – METIS\_PartGraphRecursive; б – METIS\_PartGraphKway; в – METIS\_PartGraphVKway

Пример двумерной декомпозиции сетки диаграммы Вороного с помощью библиотек SCOTCH и MeTiS приведен на рис. 3. Для сравнения с декомпозицией SCOTCH мы использовали декомпозицию MeTiS, полученную с помощью процедуры METIS\_PartGraphKway, т. к. разработчики библиотеки MeTiS рекомендуют для выполнения декомпозиции именно эту процедуру.

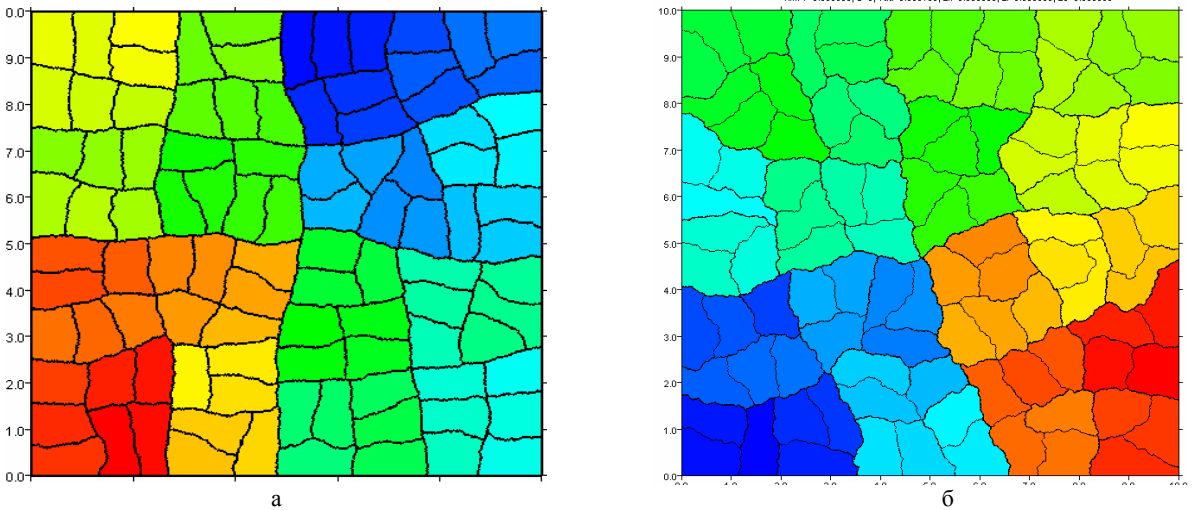


Рис. 3. Двумерная декомпозиция на 100 компактов сетки диаграммы Вороного, используя библиотеки: а – SCOTCH; б – MeTiS (процедура METIS\_PartGraphKway)

## 2. Выводы по тестированию в ТИМ-2D

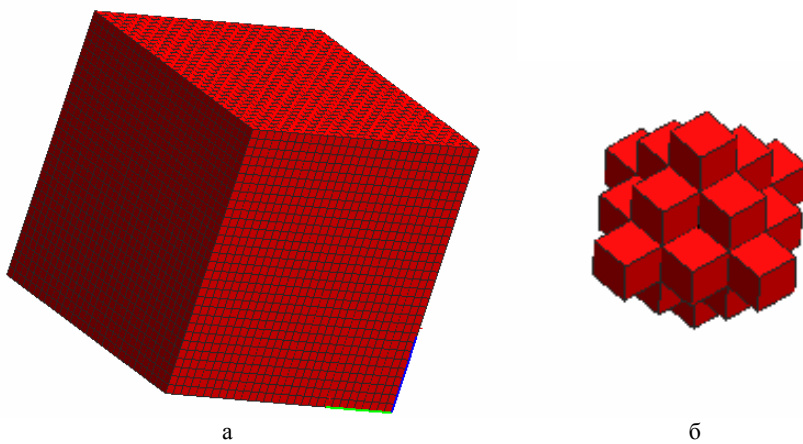
- Декомпозиция SCOTCH достаточно высокого качества (коэффициент разбалансировки не превышает 4,1 %).
- Коэффициент разбалансировки MeTiS меньше, чем в SCOTCH.
- При декомпозиции SCOTCH на четное количество компактов коэффициент разбалансировки несколько меньше (~ 1 %).
- В SCOTCH более гладкие границы компактов по сравнению с декомпозициями MeTiS.

- В декомпозиции SCOTCH достаточно большое количество маленьких границ соприкосновения между компактами, состоящих всего из нескольких ребер.

## 3. Декомпозиция в трехмерном случае

- В трехмерном случае декомпозиции выполнялись на неструктурированных сетках трех типов:
1. Шестигранная сетка (рис. 4):



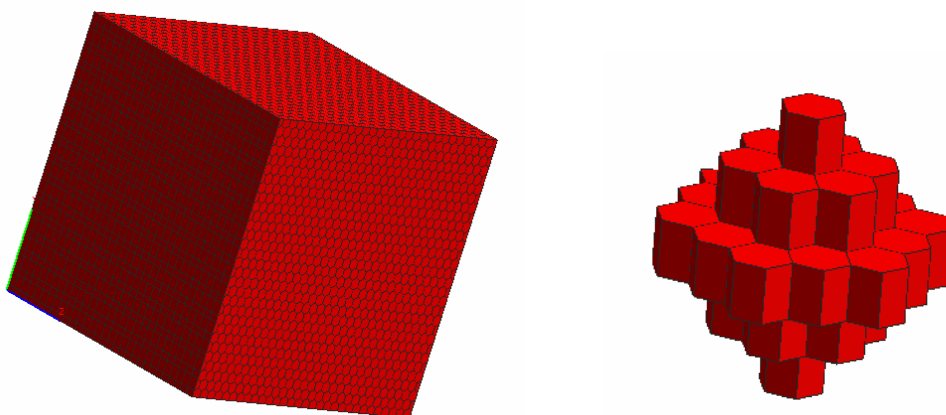


а

б

Рис. 4. Фрагмент шестигранной сетки (а); вид внутренней ячейки шестигранной сетки с тремя слоями соседей (б)

2. Восьмигранная сетка (рис. 5):

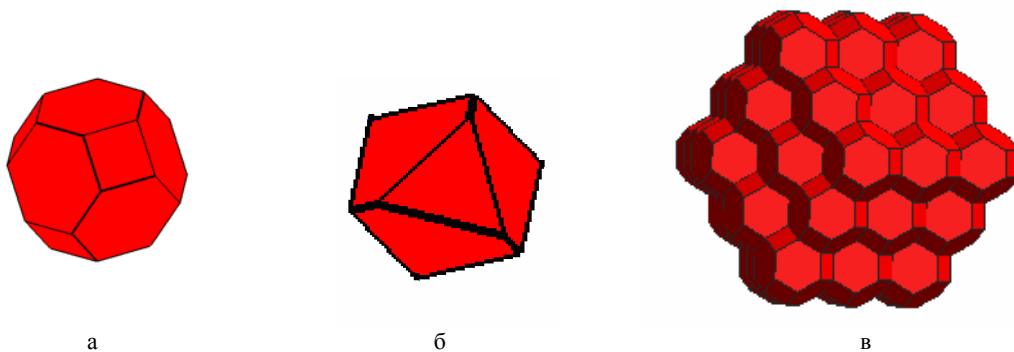


а

б

Рис. 5. Фрагмент восьмигранной сетки (а); вид внутренней ячейки восьмигранной сетки с тремя слоями соседей (б)

3. Сетка диаграммы Вороного (рис. 6):



а

б

в

Рис. 6. Вид внутренней ячейки диаграммы Вороного (а); вид угловой ячейки диаграммы Вороного (б); вид внутренней ячейки с тремя слоями сетки диаграммы Вороного (в)

Декомпозиция трехмерной сетки с помощью библиотеки MeTiS тоже выполнялась через три различные процедуры (рис. 7):

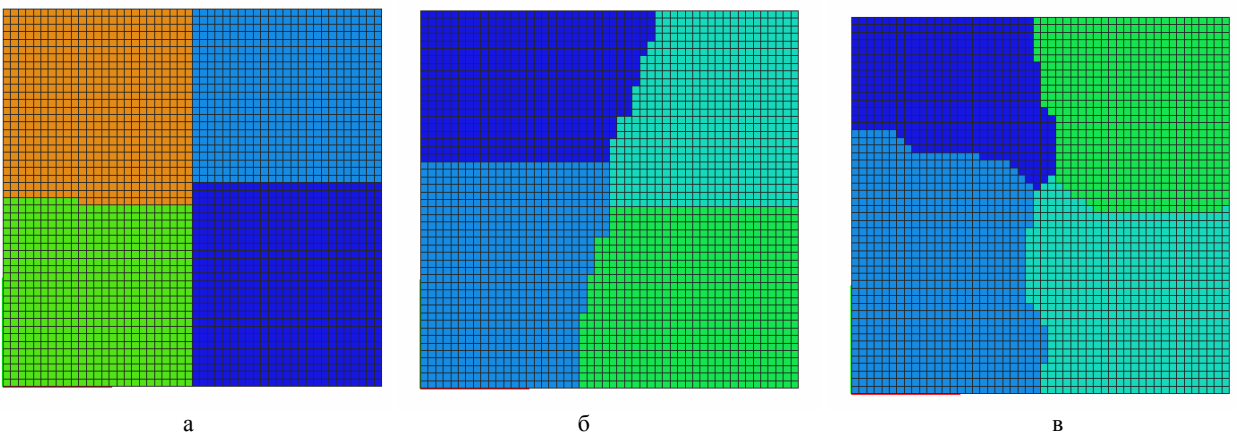


Рис. 7. Сечение плоскостью Z декомпозиций шестигранной сетки (1005000 ячеек) на 8 компактов через библиотеку MeTiS по различным процедурам: а – METIS\_PartGraphRecursive; б – METIS\_PartGraphKway; в – METIS\_PartGraphVKway

Пример трехмерной декомпозиции восьмигранной сетки на 8 компактов с помощью библиотек SCOTCH и MeTiS приведен на рис. 8:

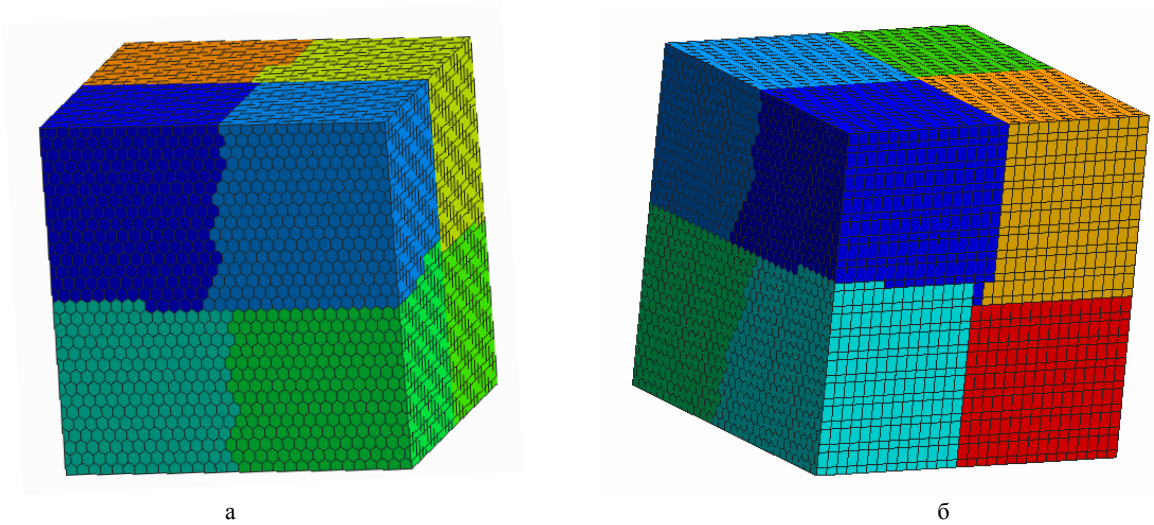


Рис. 8. Трехмерная декомпозиция восьмигранной сетки, используя библиотеки: а – SCOTCH; б – MeTiS (процедура METIS\_PartGraphKway)

При выполнении декомпозиции MeTiS было возможно получение компактов с дефектом в виде наличия выступающего слоя шириной в одну ячейку (рис. 9):

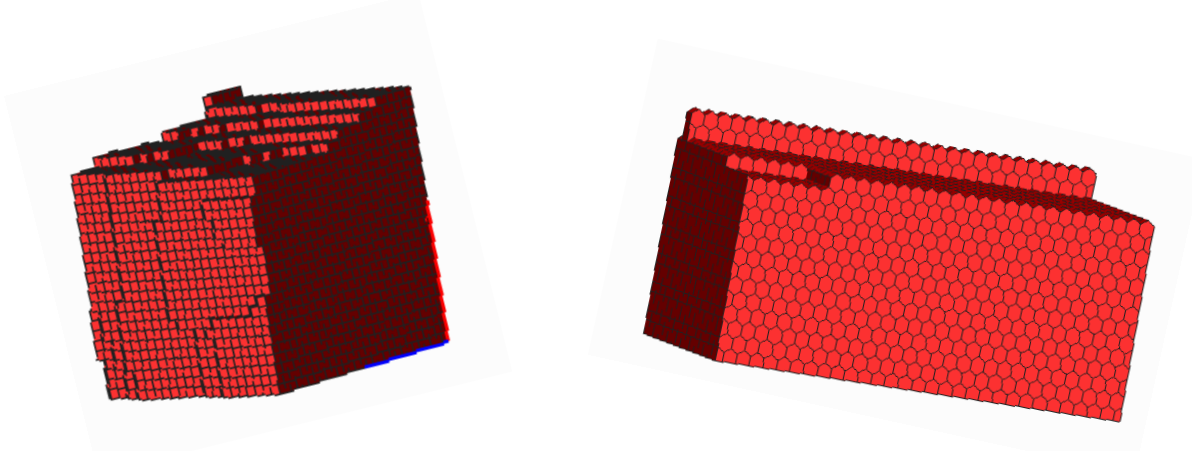


Рис. 9. Выступающий слой шириной в одну ячейку (трехмерная декомпозиция с помощью библиотеки MeTiS)

При выполнении декомпозиции с помощью библиотеки SCOTCH возможно получение маленькой поверхности соприкосновения между компактами (рис. 10), но так как методика ТИМ считает в параллельном режиме и без наложения, то такая ситуация не является для нас критичной.

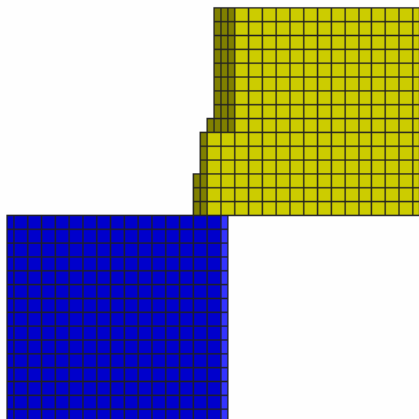


Рис. 10. Маленькая поверхность соприкосновения (трехмерная декомпозиция с помощью библиотеки SCOTCH)

В табл. 3 и 4 представлены результаты декомпозиций больших сеток на МП-30 на 100 компактов.

Таблица 3

Декомпозиции шестигранных сеток больших размеров на МП-30

Количество ячеек	Время декомпозиции MeTiS (с)	Время декомпозиции SCOTCH (с)
10 000 000	42	210
20 000 000	83	374
22 520 000	93	423
62 000 000	–	959

Таблица 4

Декомпозиции восьмигранных сеток больших размеров на МП-30

Количество ячеек	Время декомпозиции MeTiS (с)	Время декомпозиции SCOTCH (с)
5 000 000	27	119
10 000 000	53	219
16 500 000	70	355
54 000 000	–	906

#### 4. Выводы по тестированию в ТИМ-3D

- По интегральным характеристикам (разбалансировка, количество разрезанных ребер) качество декомпозиции оказывается близким.
- При декомпозиции SCOTCH компакты имеют геометрически более правильную форму.
- В декомпозиции MeTiS в ряде случаев возникают особенности, выражающиеся в появлении тонких выдающихся слоев в одну ячейку. При такой декомпозиции значительно возрастает вероятность «перебития» параобластей.
- SCOTCH требует примерно в 3 раза меньше оперативной памяти.

На основе проведенного тестирования в методике ТИМ-3D для задач газодинамики и упругопла-

стичности по умолчанию установлена декомпозиция SCOTCH.

#### Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропин А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных много-гранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 37 – 52.
2. Соколов С. С., Воропин А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29 – 43.
3. Pellegrini F. SCOTCH: Static Mapping, Graph, Mesh and Hypergraph Partitioning, and Parallel and Sequential Sparse Matrix Ordering Package. <http://www.labri.fr/person/pelegrin/scotch/>.
4. ParMETIS – Parallel Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering [gkhome/ http://glaros.dtc.umn.edu/metis/parmetis/overview](http://glaros.dtc.umn.edu/metis/parmetis/overview).

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

*А. С. Рыбкин, А. Н. Залялов, А. Г. Малькин, С. П. Огнев, В. И. Рослов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Одной из основных сфер внедрения программных комплексов на базе гибридных вычислительных систем с графическими арифметическими ускорителями является атомная энергетика. В частности, важнейшей задачей при разработке и эксплуатации сложных технических объектов атомной энергетики является расчет критических параметров систем.

В практике ВНИИЭФ для расчета критических параметров методом Монте-Карло используется программный комплекс, являющийся развитием программы С-95 [1], написанный на языке программирования Фортран-90 и предназначенный для универсальных вычислительных систем. Задействование графических арифметических ускорителей потребовало создание новой программы, способной выполняться на гибридных вычислительных системах. Разработка программы, адаптированной к особенностям архитектуры гибридной вычислительной системы, потребовала коренного изменения структуры комплекса. В данном докладе приводятся результаты разработки программы, в результате чего основная часть кода для расчета критических параметров комплекса переведена на графические арифметические ускорители. Представлены характерные для данного класса задач тесты и первые численные исследования разрабатываемой программы на гибридных вычислительных системах.

Численные исследования проводились на высокопроизводительной вычислительной системе ГВС-10 «Кубань» с универсальным процессором архитектуры x86 и арифметическим ускорителем (ArV) основанном на графических процессорах фирмы NVIDIA GeForce GTX295.

## Постановка задачи

Метод Монте-Карло является одним из основных методов для определения эффективного коэффициента размножения нейтронов активных зон (АЗ) ядерных реакторов, обоснования радиационной и ядерной безопасности транспортных упаковочных комплектов (ТУК) для перевозки и долговременного хранения отработанного ядерного топлива АЭС. Для данного класса задач характерным является наличие

большого количества (порядка нескольких сотен) тепловыделяющих систем (ТВС), которые заполняют внутренность АЗ или ТУК. Каждая из ТВС, в свою очередь, содержит несколько сотен тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), конструкционных и управляющих стержней. Кроме того, ТВС отличаются друг от друга химическими составами ТВЭЛ. Такое детальное описание задач создает определенные трудности, как при подготовке начальных данных, так и при проведении расчетов.

В разработанной программе основным объектом в задании геометрических данных выбран геометрический блок. Блок представляет собой совокупность областей и поверхностей определенного типа.

В задаче может быть описано произвольное количество блоков. Они рассматриваются как независимые «строительные» элементы, которые следует так разместить друг относительно друга, чтобы составить требуемую геометрию системы. Геометрия, составленная из вложенных друг в друга блоков, напоминает «матрешку». Отличие состоит лишь в том, что в блок можно вкладывать не один, а несколько других (не обязательно разных) блоков. Важно лишь, чтобы размещенные блоки не пересекались между собой и не выходили за пределы блока-вместилища.

Расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  выполняется методом Монте-Карло по поколениям нейтронов. Очередное поколение нейтронов формируется моделированием траектории нейтронов предыдущего поколения до первой точки деления. Во время моделирования производится снятие результатов с траекторий частиц. Моделирование прекращается по достижении заданной точности  $k_{эфф}$ .

Источник определяет фазовые параметры начального распределения нейтронов. В начале счета задач, в течение нескольких поколений нейтронов, выполняется моделирование траекторий без снятия с них результатов (процесс установления собственной функции).

Моделирование траекторий осуществляется в соответствии с выбранной системой констант взаимодействия частиц с веществами. Для розыгрыша свободного пробега и выбора вещества, на котором произошло столкновение, используется схема максимальных кусочно-постоянных сечений. Учет теплового движения ядер среды происходит либо в прибли-

жении свободного максвелловского газа (FRGAS), либо с учетом химических связей вещества (модель  $S(\alpha, \beta)$ ).

Для расчета  $k_{эфф}$  используется одна оценка по пробегу и три оценки по столкновениям: по собственно столкновениям, по делениям и по поглощениям. Оптимальная оценка вычисляется на основе этих четырех оценок.

### Модификация программы для использования на АрУ

Специфика программирования на АрУ потребовала существенного изменения алгоритма работы программы и системы хранения данных.

Счетная часть программы была переведена на язык программирования С. При этом все структуры данных были трансформированы в одномерные массивы, передача данных в процедуры и функции осуществлялась явно в виде параметров подпрограмм без использования модулей.

В отличие от стандартного метода, где все частицы одного поколения моделируются последовательно, в новой программе предназначенной для работы на гибридных вычислительных системах с графическими арифметическими ускорителями различные части траектории частиц (расчет расстояния, свободный пробег, розыгрыш столкновения и т. д.) рассчитываются параллельно для всех частиц поколения.

### Описание тестовых задач

Для тестирования программы выбраны две тестовых задачи. Их подготовка основана на результатах расчета активной зоны реактора ВВЭР-1000 с 1/3 загрузкой МОХ-топлива, выполненной специалистами Курчатовского института [2].

В качестве первого теста была выбрана бесконечная система, состоящая из ТВС с одним и тем же химическим составом ТВЭЛ. Геометрия задачи представлена на рис. 1а, в качестве второго теста было выбрано одно из состояний АЗ реактора ВВЭР-1000 из работы [2]. Картограмма заполнения АЗ представлена на рис. 1б. В силу симметрии АЗ расчеты проводились 1/6 части АЗ с применением тактики отражения на границах. На рисунке разные химические составы ТВЭЛ в ТВС выделены разным цветом.

### Гибридная вычислительная система ГВС-10 «КУБАНЬ»

Система содержит вычислительный модуль с универсальным процессором Intel Core i7-920, работающий на тактовой частоте 2,66 ГГц и арифметический ускоритель.

АрУ состоит из графических процессоров (ГП) NVIDIA GT200 и оперативной памяти типа GDDR3. Объем оперативной памяти доступный каждому ГП составляет 896 МБ.

Структура гибридной вычислительной системы представлена на рис. 2.

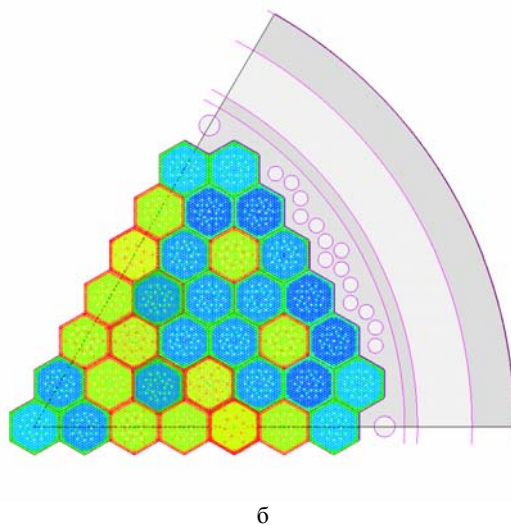
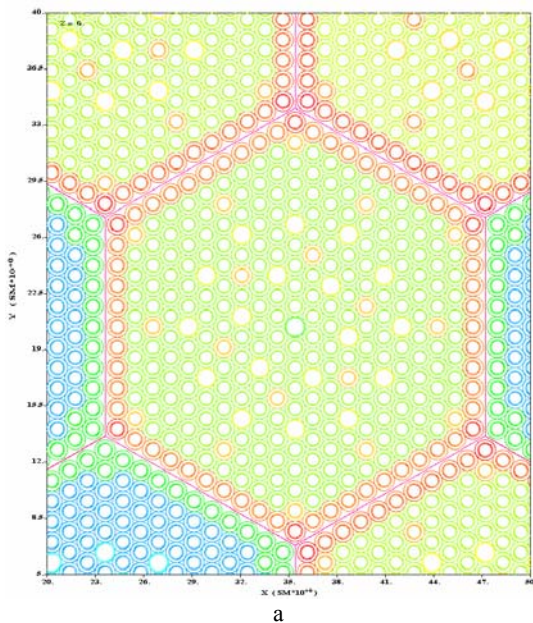


Рис. 1. Поперечное сечение ТВС(а) и 1/6 картограммы заполнения АЗ (б)

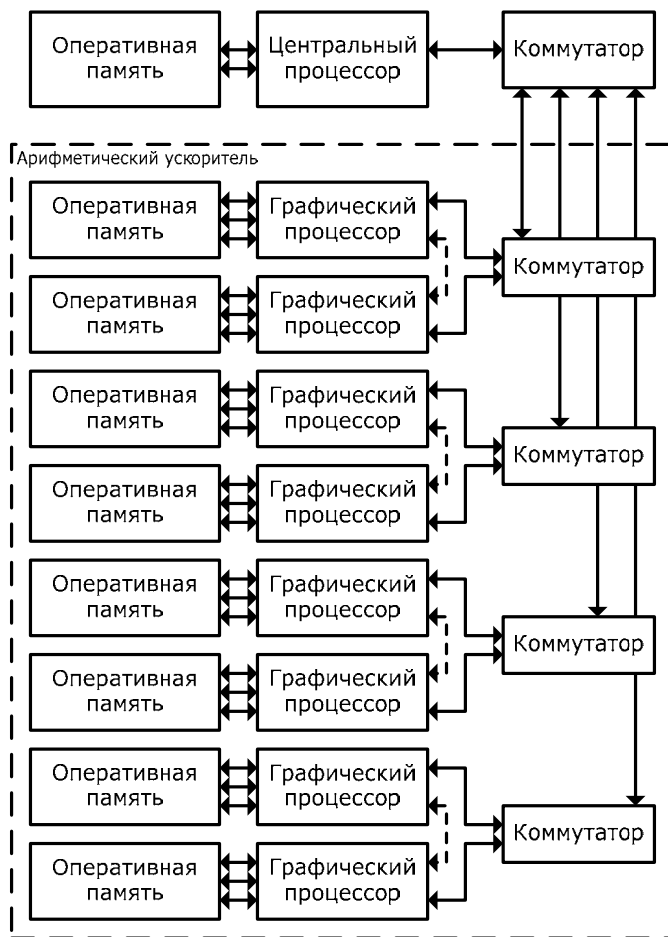


Рис. 2. Структурная схема ГВС-10 «Кубань»

ГП NVIDIA GT200 содержит 30 векторных ядер и 7 64-битных контроллеров памяти. Векторные ядра ГП работают на частоте 1,242 ГГц. Теоретическая пиковая производительность вычислительной системы составляет 638 ГФ/с. Агрегированная пропускная способность памяти Ару составляет 896 ГБ/с. Интерфейс подключения Ару – PCI Express 2.0 x16 (четыре шины).

В состав системного программного обеспечения входят операционная система Microsoft Windows Server 6 R2 для платформы x86\_64, библиотека межпроцессорных обменов MPI MPICH2-1.1.1, сконфигурированная для работы с системой программирования Intel Fortran 11.0.72. Для графического арифметического ускорителя использовалась NVIDIA CUDA 3.0 SDK.

### Результаты тестирования

В данной главе приводятся результаты тестирования программы в четырех конфигурациях:

- вычислительный процесс с использованием одного ядра универсального процессора;
- вычислительный процесс с использованием четырех ядер универсального процессора;

– вычислительный процесс с использованием одного ядра универсального процессора и одного ГП Ару;

– вычислительный процесс с использованием четырех ядер универсального процессора и восьми ГП Ару.

Численные исследования выполнялись на различном числе траекторий в пакете (ансамбле). Максимальное количество траекторий в пакете определялось доступным объемом оперативной памяти ГП. Для иллюстрации все расчеты выполнялись для двух пакетов установления собственной функции и двух пакетов счета.

Далее на рис. 3, 4 приняты следующие обозначения коэффициентов ускорения:

– «k0». Коэффициент ускорения, определяемый соотношением длительности вычисления на одном ядре универсального процессора Intel Core i7-920 к длительности вычисления одного ядра универсального процессора и на одного графическом процессоре Ару;

– «k1». Коэффициент ускорения, определяемый соотношением длительности вычисления на четырех ядрах универсального процессора Intel Core i7-920 к длительности вычисления на четырех ядрах универсального процессора и восьми графических процессорах Ару.



## Расчет тепловыделяющей сборки

В табл. 1, 2 представлены длительности счета для различных частей разработанной программы:

1 – розыгрыш параметров частицы после столкновений;

2 – процедура розыгрыша столкновений частиц;

3a – блок гибели;

3b – расчет расстояния до границы области вдоль направления полета частицы;

3c – розыгрыш свободного пробега частиц;

sort – сортировка частиц для оптимальной загрузки АрУ.

В табл. 1 представлено время счета ТВС при задействовании одного ядра универсального процессора.

Аналогично, в табл. 2 представлены значения длительности вычислений при задействовании АрУ.

Из таблицы видно, что большую часть времени занимает сортировка частиц. Данная процедура в настоящее время реализована в последовательном режиме. Ведутся работы по ее распараллеливанию, что приведет к снижению времени счета. Также достаточно большое время занимает поиск расстояний вдоль полета частицы. Авторы изучают возможность оптимизации алгоритмов для ускорения этого блока.

Необходимо отметить, что при масштабировании количества ГП в АрУ эффективность использования остается на прежнем уровне, и не снижается с увеличением их числа.

Таблица 1

Длительность вычислений на универсальном процессоре, в секундах

Тип	Количество траекторий в пакете, тыс. шт.						
	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4
1	0,4	0,8	1,9	4,3	9,4	21,6	46,0
2	2,0	4,3	9,7	21,2	46,8	109,2	235,6
3a	1,8	3,8	9,1	22,0	52,2	131,4	282,1
3b	45,0	90,8	183,2	370,5	748,0	1537,8	3113,1
3c	9,2	19,3	40,8	86,0	186,0	419,5	889,1
Sort	0,3	0,6	1,2	2,5	6,2	18,7	55,9
ИТОГО	58,7	119,6	245,8	506,4	1048,6	2238,1	4621,9

Таблица 2

Длительность вычислений на АрУ, в секундах

Устройство	Тип	Количество траекторий в пакете, тыс. шт.						
		1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4
Графический арифметический ускоритель	1	0,6	1,2	1,7	2,3	3,5	6,0	10,4
	2	1,2	3,3	5,7	9,0	14,0	24,5	42,1
	3a	0,5	1,2	1,6	2,9	3,6	5,8	7,9
	3b	10,6	19,2	27,5	38,8	58,8	99,2	170,7
	3c	5,5	13,7	22,9	33,1	50,2	85,8	145,4
	sort	20,3	60,6	131,1	272,5	534,9	1076,5	2125,4
Универсальный процессор	1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
	2	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6
	3a	0,9	1,0	1,1	1,4	1,7	2,0	2,1
	3b	17,0	16,1	15,5	16,8	20,0	19,0	18,3
	3c	5,2	5,6	6,0	6,9	7,9	8,0	8,2
	sort	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
ИТОГО		63,4	123,8	215,2	386,3	697,5	1330,0	2533,7



На рис. 3 проиллюстрированы значения коэффициентов ускорения при расчете ТВС при различных значениях количества траекторий в пакете.

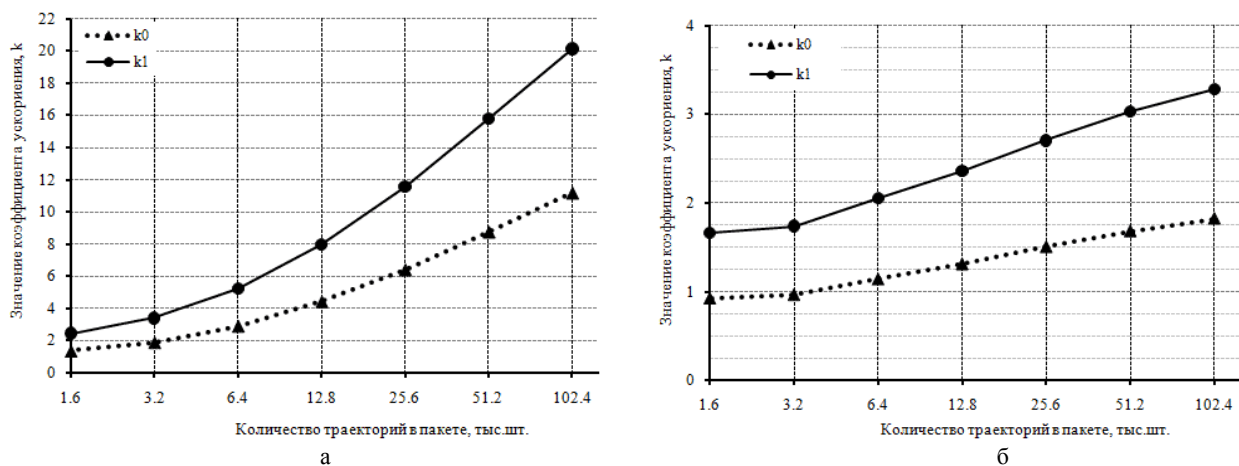


Рис. 3. Значения коэффициентов ускорения: а – всей задачи; б – счетной части (без сортировки)

При количестве траекторий равно 102400 шт. ускорение всей задачи составляет 1,82 раза при задействовании одного графического процессора АрУ. С использованием восьми ГП АрУ длительность вычислений уменьшается в 3,28 раза по сравнению с четырьмя ядрами универсального процессора Intel Core i7-920.

### Расчет активной зоны

В табл. 3 представлено время счета отдельных частей расчета активной зоны (АЗ) на универсальном процессоре.

Таблица 3

Длительность вычислений на универсальном процессоре, в секундах

Тип	Количество траекторий в пакете, тыс. шт.							
	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4	204,8
1	0,4	0,9	2,1	4,8	10,6	24,5	51,6	108,1
2	2,0	4,2	9,4	21,5	48,1	111,2	234,5	497,6
3a	1,8	3,7	8,9	22,1	54,3	135,7	280,7	624,0
3b	48,8	98,4	197,1	402,4	814,4	1664,0	3395,3	6824,9
3c	13,6	28,3	59,0	126,9	266,7	574,9	1178,2	2389,2
Sort	0,1	0,3	0,5	1,4	3,4	7,8	19,9	55,4
ИТОГО	66,7	135,8	276,9	579,0	1197,5	2518,2	5160,2	10499,2

В табл. 4 приведено время счета задачи с использованием АрУ.

Таблица 4

Длительность вычислений на АрУ, в секундах

Тип	Количество траекторий в пакете, тыс. шт.							
	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4	204,8
1	0,6	0,7	1,0	1,6	2,9	5,5	10,9	21,4
2	2,7	3,3	4,6	6,3	9,8	17,5	34,0	68,1
3a	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,5	3,0	6,5
3b	65,4	84,6	118,8	174,9	271,4	473,1	823,2	1538,6
3c	24,3	31,0	42,1	57,9	85,9	144,3	265,8	507,5
Sort	22,6	43,0	83,9	164,0	323,9	642,2	1278,6	2557,7
ИТОГО	115,9	163,0	250,9	405,3	694,8	1284,0	2415,4	4699,8

На рис. 4 проиллюстрированы значения коэффициентов ускорения при расчете АЗ при различных значениях количества траекторий в пакете.

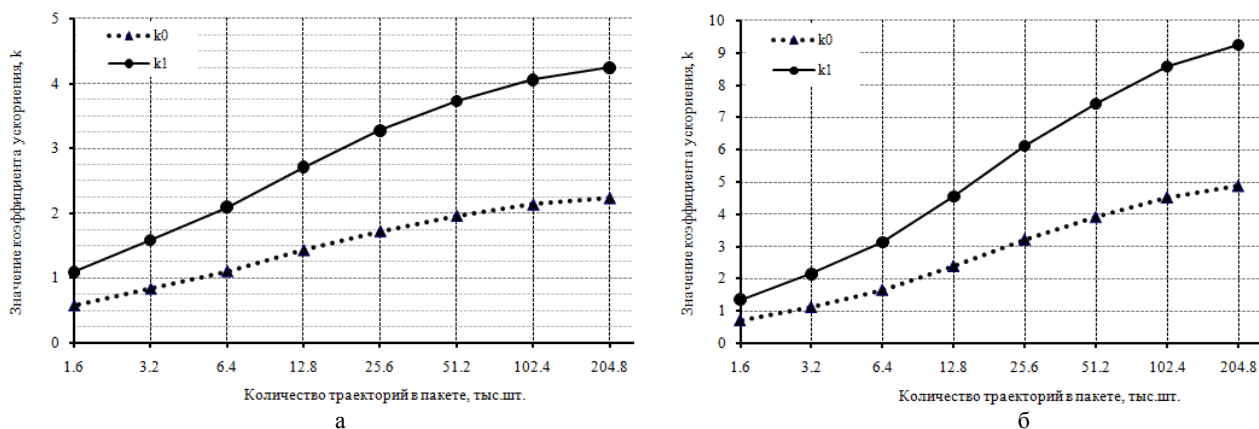


Рис. 4. Значения коэффициентов ускорения: а – всей задачи; б – счетной части (без сортировки)

При количестве траекторий равного 204800 шт. ускорение всего расчета АЗ составляет 4,24 раза по сравнению с четырьмя ядрами универсального процессора при задействовании восьми графических процессоров ГВС-10 «Кубань».

### Заключение

При количестве траекторий равного 102400 шт. ускорение расчета ТВС составляет 1,82 раза при задействовании одного графического процессора АрУ. С использованием восьми ГП АрУ длительность вычислений уменьшается в 3,28 раза по сравнению с четырьмя ядрами универсального процессора Intel Core i7-920.

При количестве траекторий равного 204800 шт. ускорение всей задачи расчета активной зоны составляет 4,24 раза по сравнению с четырьмя ядрами универсального процессора при задействовании восьми графических процессоров ГВС-10 «Кубань».

### Литература

1. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Огнев С. П., Семенова Т. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000, № 2. С. 49–52.
2. Gomin E., Kalugin M., Oleynik D. VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark. OECD 2006, NEA № 6088.

# МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА БОУЭРА – УОТСОНА ГЕНЕРАЦИИ ДВУМЕРНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК В ОБЛАСТЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

М. Л. Сидоров

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Генерация пространственных сеток является одной из основных задач при решении уравнений математической физики численными сеточными методами.

В работе предложен алгоритм построения двумерной нерегулярной сетки в области произвольной формы. В основе алгоритма лежит удовлетворение двух требований: итоговая сетка должна иметь как можно меньшую меру геометрической и топологической нерегулярности. Первое требование удовлетворяется с помощью модификации алгоритма Боуэра – Уотсона (Bowyer, Watson) [1, 2], основанном на улучшении грубой триангуляции области. Второе требование удовлетворяется с помощью фронтального подхода и комплекса мер, направленных на приведение многоугольников фронта к шестиугольному виду. Алгоритм триангуляции области использует функцию распределения характерного размера ячеек, являющуюся численным решением методом конечных элементов уравнения стационарной теплопроводности с заданной на границе области и во внутренних источниках температурой. Здесь под температурой понимаются длины граничных ребер, полученные после разбиения границы, заданного пользователем.

## Алгоритм генерации нерегулярной сетки

Описываемый алгоритм, основан на двух принципах. Первый, – это минимизация меры геометрической нерегулярности

$$MG = \frac{1}{N_{\Delta}} \sum_{\Delta_i}^{N_{\Delta}} \left( \frac{1}{2} - \frac{r_{\Delta_i}}{R_{\Delta_i}} \right),$$

где  $r$  – радиус вписанной в треугольник  $I$  окружности;  $R$  – радиус описанной около треугольника  $I$  окружности, суммирование ведется по всем треугольникам.

Второй, – это минимизация меры топологической нерегулярности

$$MT = \frac{\sum_{I \in \text{InternalCells}} |6 - \text{Valency}(I)|}{\text{NumberOfInternalCells}},$$

где под валентностью ( $\text{Valency}$ ) понимаем число треугольников вокруг точки, суммирование ведется по всем внутренним точкам. Для правильной треугольной сетки  $MG = 0$  и  $MT = 0$ .

В общем случае этот генератор должен уметь создавать анизотропные сетки, но на данный момент реализован случай изотропных сеток, допускающих изменение характерного размера ячеек.

В головной программе используются две основных процедуры – процедура **MININGEOME** и процедура **BLASTOME**. Входными данными являются два одномерных массива координат, определяющих контур. На выходе из процедуры выдается триангуляция области в треугольном формате (треугольник  $I$  ссылается на три точки  $P1, P2, P3$ , и три своих соседа  $M1, M2, M3$  против часовой стрелки от каждой из точек, рис. 1).

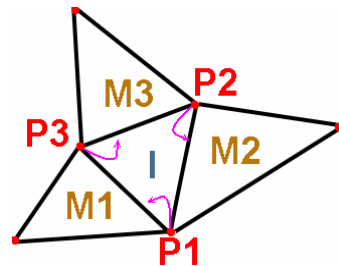


Рис. 1. Треугольный формат хранения топологии сетки

Реализованный генератор состоит из двух основных программ – стандартных этапов при генерации сетки. Первая программа – программа триангуляции области, ограниченной заданным контуром. При ее создании автор руководствовался тем, что программа должна быть проста в организации и реализации, без сложных структур и критериев. В результате анализа алгоритмов, описанных в различных источниках, был выдвинут проект генератора с неупорядоченным фронтом, работающим на принципе уменьшения меры геометрической нерегулярности исходной триангуляции области.

Вторая программа, программа уменьшения меры топологической нерегулярности, использует различные операции с сеткой, описанные ниже, для уменьшения числа не шестиугольников, и увеличения числа шестиугольников. Здесь и далее под многоугольником понимается медианный конечный объем – фигура, полученная соединением центром треугольников. Количество углов многоугольника для внутренней точки равно валентности данной точки.

Кратко опишем весь процесс получения сетки на примере одной области.

Дискретный контур области получается из непрерывного с помощью программ разбиения кривых. После того, как контур получен, производится начальная триангуляция области, ограниченной данным контуром. Мы не будем останавливаться на описании алгоритма триангуляции контура, скажем лишь, что для первых двух этапов подходит любая невырожденная сколь угодно плохая триангуляция контура. Пример триангуляции представлен на рис. 2.

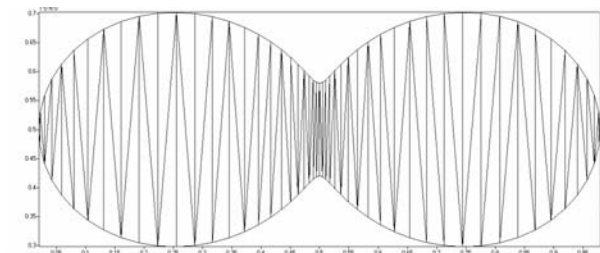


Рис. 2. Начальная триангуляция области, ограниченной контуром

Для построения сетки необходима функция распределения характерных размеров длин ребер ячеек –  $D(x, y)$ . С целью получения качественного результата желательно иметь гладкое распределение характерного размера на контуре (то есть гладкие граничные условия). В описываемом алгоритме функция распределения находится численно перед этапом построения сетки, но отличным от описанных выше способов. Данная функция в описываемом ниже алгоритме является решением уравнения стационарной теплопроводности с заданной на границе температурой  $(\Delta D = 0, D(x, y)|_{(x,y) \in \Gamma} = \ell(x, y))$ , характерный размер в точке граничного контура равен полусумме

длин граничных ребер, сходящихся в точку. После начальной триангуляции (рис. 2) области, ограниченной заданным контуром, производится анализ треугольников на наличие градиента характерного размера. Если градиент существенно отличен от нуля, то для улучшения аппроксимации в центр треугольника добавляется точка. После прохода по всем старым (то есть без новых треугольников, образованных при добавлении точки) треугольникам и перестройки полученных треугольников, мы получаем первую сетку (рис. 3) для нахождения функции  $D(x, y)$  с помощью метода конечных элементов. Полученную в результате систему линейных уравнений решаем в последовательном режиме с помощью библиотеки PMLP [2].

После нахождения искомой функции мы повторяем ту же последовательность действий: проход по треугольникам, добавление точек, перестройка, решение уравнения стационарной теплопроводности. Число итераций ограничено двумя, чтобы сетка для определения функции распределения была не слишком подробной в зоне сильных градиентов. Итерации были введены, чтобы улучшить аппроксимацию функции распределения в случае ее нелинейного характера. Найдя численное представление функции распределения, запоминаем сетку, на которой она была найдена, как фоновую и восстанавливаем первоначальную триангуляцию области. Найденное численное решение уравнение Лапласа с граничными условиями 1 рода для данной задачи представлено на рис. 4.

После восстановления первоначальной триангуляции запускаем итерационный процесс построения сетки. Опишем основные детали алгоритма.

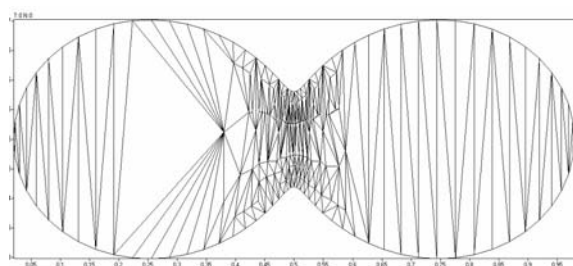
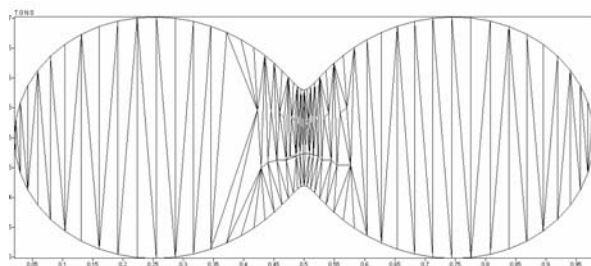


Рис. 3. Фоновая сетка для нахождения функции распределения. После 1-й и 2-й итерации

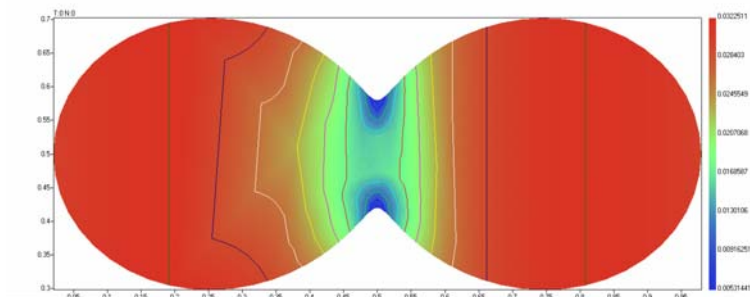


Рис. 4. Поле функции распределения

Набирается множество существующих треугольников, назовем его **O**. Из множества **O** выбираются треугольники, обладающие мерой искажения  $M < 0,9$

( $M$  вычисляется по формуле  $M = 4\sqrt{3} \frac{S_{\Delta}}{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}$ )

и удовлетворяющие условию: число сторон треугольника с длинами меньше 1.2 виртуальной длины не равно 3. Под виртуальной длиной ребра понимаем среднее арифметическое из двух характерных размеров  $D(i), D(j)$ , вычисленных на фоновой сетке. Далее выбирается ребро фронта из условия  $0,8 < L/D < 1,2$ , где  $L(i, j)$  – настоящая длина ребра. После этого от середины выбранного ребра **I, J** строится нормаль с длиной, равной минимуму из виртуальной длины ребра и предполагаемым характерным размером  $D^*$  новой точки **K**. Две эти ситуации показаны на рис. 5.

Производится нахождение треугольника **T**, в который попала предполагаемая новая точка. Это делается итерационно: от текущего треугольника набираются соседи 1-го, 2-го и т. д. порядков, пока не будет найден содержащий точку треугольник. Производится проверка на близость точки к точкам найденного треугольника по критерию: расстояние от точки до вершин треугольника меньше 1.5 от характерного размера, вычисленного в точке. Если проверка пройдена, то точка добавляется, а треугольники с **B** уровня соседства к найденному треугольнику **T** подвергаются коррекции (перестройке в случае

необходимости). Характерный размер в точке вычисляется с помощью весов от треугольника фоновой сетки, куда она попала (поиск треугольника реализован так же, как это описано выше). **B** зависит от номера итерации нелинейно и может изменяться от 20 до 3. Зависимость может быть изменена пользователем в файле настройки.

После того, как все допустимые треугольники из множества **O** выбраны, образуется множество **O1** – множество старых **O** треугольников и множество **H** добавленных треугольников. Часть треугольников из **O** и **H** содержится в множестве **B**. Если множество **H** пусто, процесс построения сетки заканчивается, иначе множество **O = B** и процесс продолжается. В процессе выполнения происходит уменьшение меры геометрической нерегулярности. Результат работы данного алгоритма представлен на рис. 6.

Полученная сетка далее подвергается коррекции во втором блоке программ, отвечающем за минимизацию топологической нерегулярности. Это блок фронтальной коррекции. Фронт продвигается от границы внутрь области (неограниченно или на число уровней заданных пользователем), и на точках фронта работают специальные процедуры, корректирующие валентность точек. Цель всей топологической коррекции – уменьшить число точек с валентностью, не равной 6, а также постараться сделать так, чтобы остались только 5, 6, 7 угольники (внутри области).

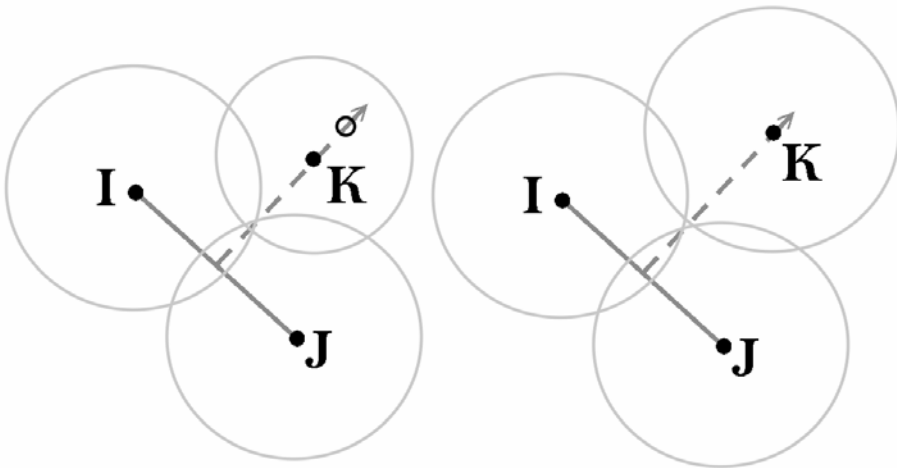


Рис. 5. Варианты построения новой точки **K** от ребра **I, J**

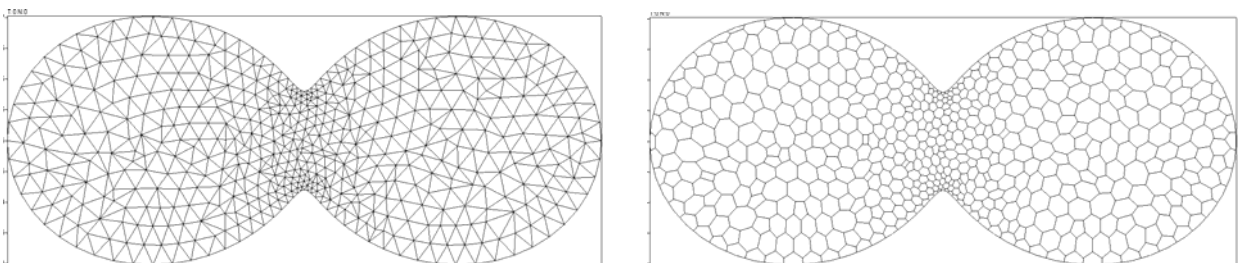


Рис. 6. Сетка после процесса уменьшения меры геометрической нерегулярности

В начале блока работает программа по коррекции граничных точек. После коррекции на границе области будет получен массив граничных точек (фронт). Затем производится коррекция фронта внутри области. В цикле по точкам фронта анализируется валентность точки и ее соседей по фронту. Если комбинация этих валентностей удовлетворяет одной из заложенной в алгоритм комбинации, то точка корректируется.

После окончания процедуры коррекции внутреннего фронта остаются ситуации, не исправленные в этой процедуре.

С целью улучшения топологической меры сетки на третьем этапе применяется набора процедур по обработке некоторых часто встречающихся случаев.

Ниже на рис. 7 представлена сетка до процесса топологической корректировки. На рис. 8 представлена сетка после топологической корректировки.

После топологической корректировки применяется сглаживание сетки с ограничением – не уменьшение минимума меры искажения треугольников вокруг точки.

В табл. 1 представлены данные для сравнения. Из данных в таблице видно, что второй и третий блок программ уменьшил число пятиугольников почти в 6 раз, а число семиугольников почти в 7 раз. Мера топологической нерегулярности уменьшилась почти в 50 раз, вместе с тем это положительно сказалось и на мере геометрической нерегулярности, она уменьшилась в 2 раза. Следует отметить, что такая процедура коррекции может приводить к появлению небольшой анизотропии в сетке.

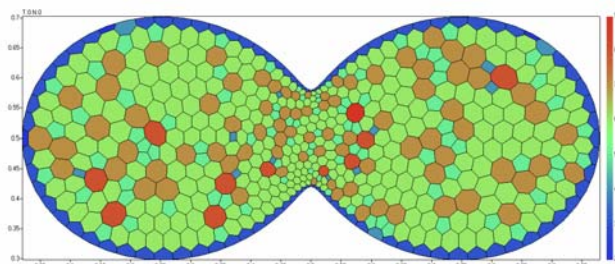


Рис. 7. Сетка до топологической корректировки

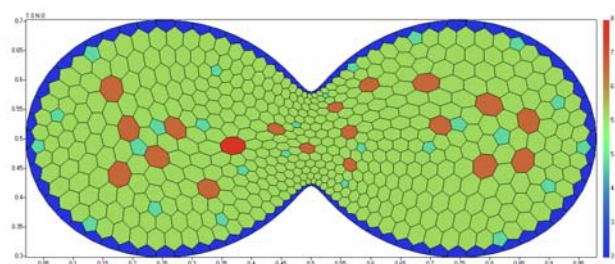


Рис. 8. Сетка до и после топологической корректировки

Таблица 1

Результаты топологической корректировки

Характеристика сетки	До коррекции	После коррекции
1-валентных	0	0
2-валентных	0	0
3-валентных	0	0
4-валентных	10	0
5-валентных	92	26
6-валентных	263	444
7-валентных	83	18
8-валентных	10	1
9-валентных	1	0
Общее число	457	489
Мера топологической нерегулярности	0,474	0,009
Мера геометрической нерегулярности	0,004	0,002
Процент пятиугольников	34,9	5,8
Процент семиугольников	31,5	4
Процент многоугольников, не являющихся шестиугольниками	4,57	0,2



После второго блока выполняется операция конвертирования базы из треугольного формата в реберный формат (ребро **I** ссылается на две точки **RV1**, **RV2**, и два ребра **RR1**, **RR2**, против часовой стрелки от каждой из точек, рис. 9), производится восполнение границы фиктивными ребрами, необходимыми для сшивки. Область считается обработанной после получения триангуляции в реберном формате.

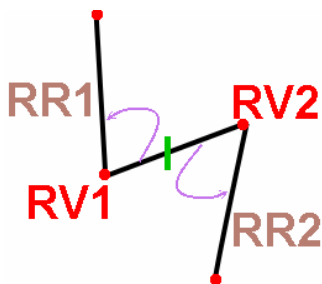


Рис. 9. Реберный формат хранения топологии сетки

В качестве дополнительной опции предусмотрено измельчение сетки и натяжение ее на контур с более подробной детализацией. Измельчение может производиться равномерно для всей сетки (сохраняя при этом отношение минимальной к максимальной длине ребра в сетке). Такое измельчение нужно

для получения сеток с большим числом точек и асимптотической топологической мерой нерегулярности  $O\left(\frac{1}{4^n}\right)$ , где  $n$  – число итераций измельчения (то есть мера стремится к нулю при измельчении сетки). Еще измельчение может производиться для достижения длинами ребер заданного пользователем размера. При этом возможны четыре ситуации: треугольник дроблению не подвергается, дробится одна, две или три стороны. Последние три варианта показаны на рис. 10.

Для оценки скорости программы MininGeoMe использовались две области (они будут показаны в примере 1 и примере 3 соответственно). Результаты представлены в табл. 2.

## Результаты применения алгоритмов

Описанные алгоритмы были реализованы в виде программ, которые тестировались на областях различной формы. Целью тестирования была проверка способности строить качественную сетку в невыпуклых областях с границей разбитой неравномерно и равномерно.

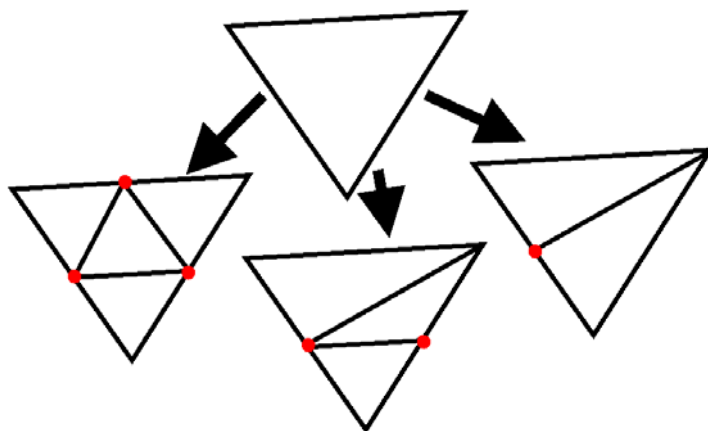


Рис. 10. Варианты дробления треугольника

Таблица 2

Времена построения сеток в зависимости от задачи

Число точек на границе	Разбиение границы	Количество треугольников	Количество точек	Время построения, с
Пример 1 – 3051	Равномерное	~ 154 000	~ 79 000	16
Пример 1 – 6107	Равномерное	~ 615 000	~ 310 000	55
Пример 1 – 6107*	Равномерное	~ 615 000	~ 310 000	27
Пример 2 – 3900	Не равномерное	~ 585 000	~ 294 000	83
Пример 2 – 5200	Не равномерное	~ 1 104 000	~ 554 000	161

Примечание. \* – это расчет без вычисления характерного размера точки в процессе построения, размер фиксировался один и тот же для всей задачи (так как разбиение границы равномерное).



## Пример 1

Область на рис. 11 представляет собой набор отрезков, разбитых неравномерно.

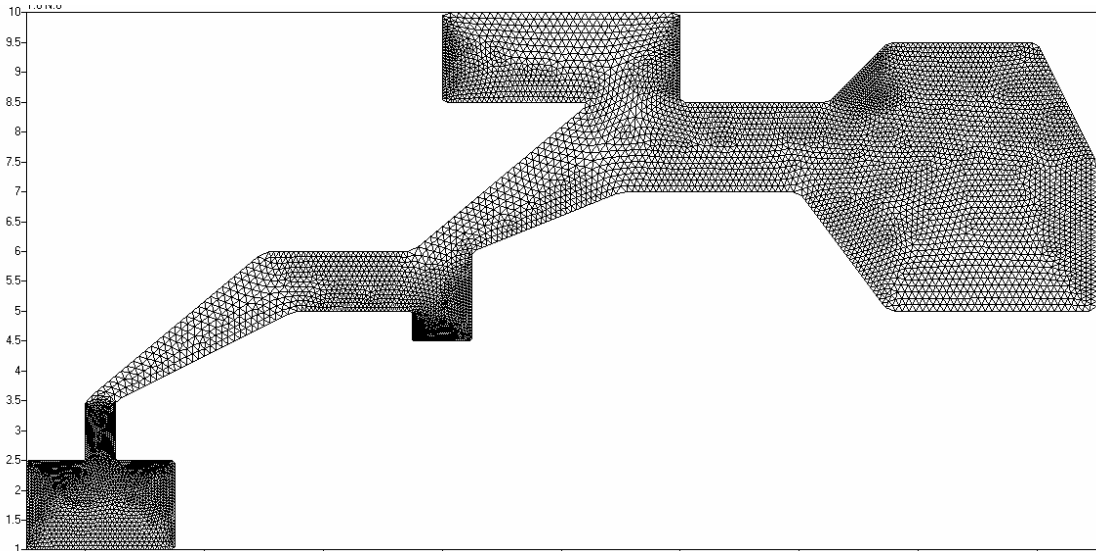


Рис. 11. Сетка из примера 1

На рис. 12 представлены фрагменты сетки.

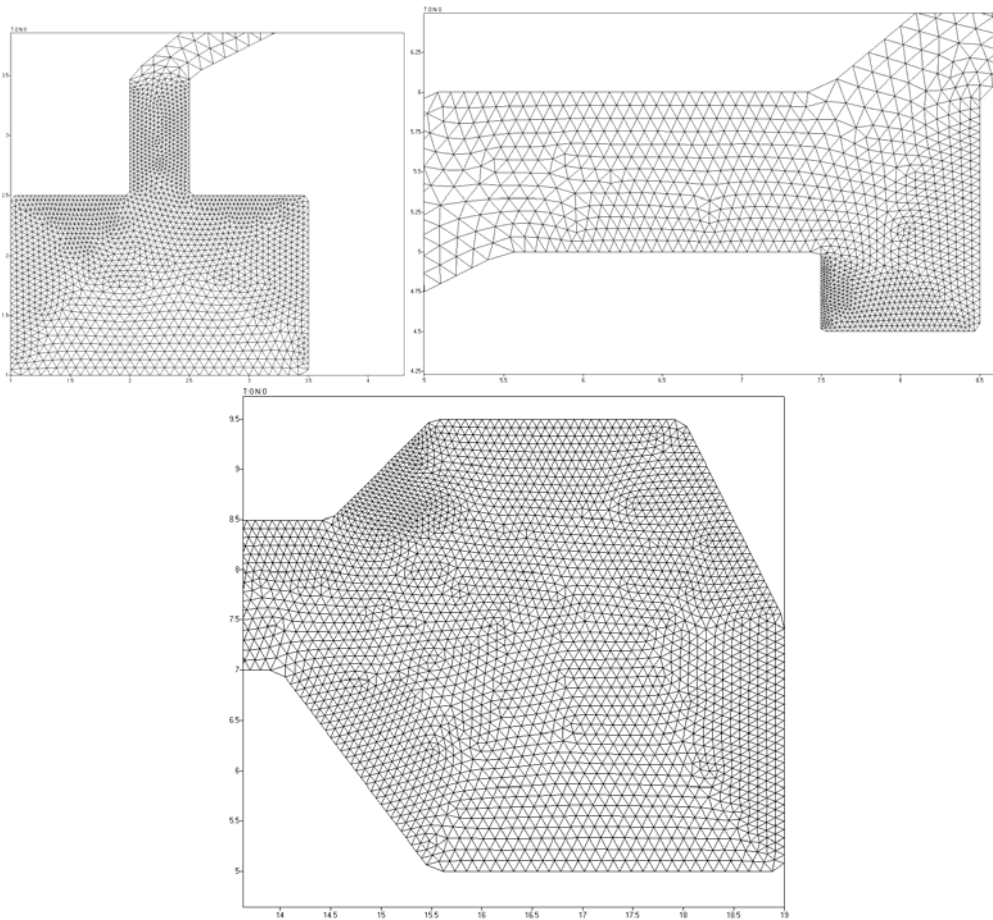


Рис. 12. Фрагменты сетки из примера 1

## Пример 2

Ниже на рис. 13 представлена сетка в области с границей разбитой неравномерно. На рисунке сетка без проведения фронтальной коррекции, на рисунке сетка с примененной фронтальной коррекцией.

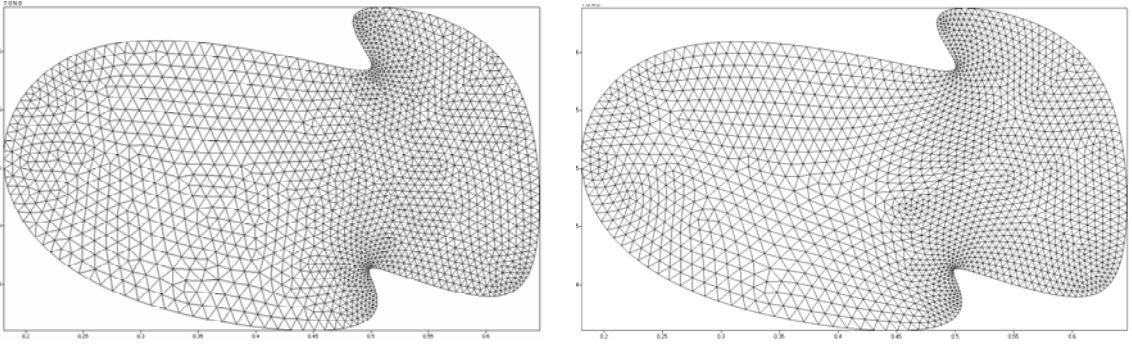


Рис. 13. Сетка из примера 2

## Пример 3

На рис. 14, 15 показана область с неравномерно разбитой границей.

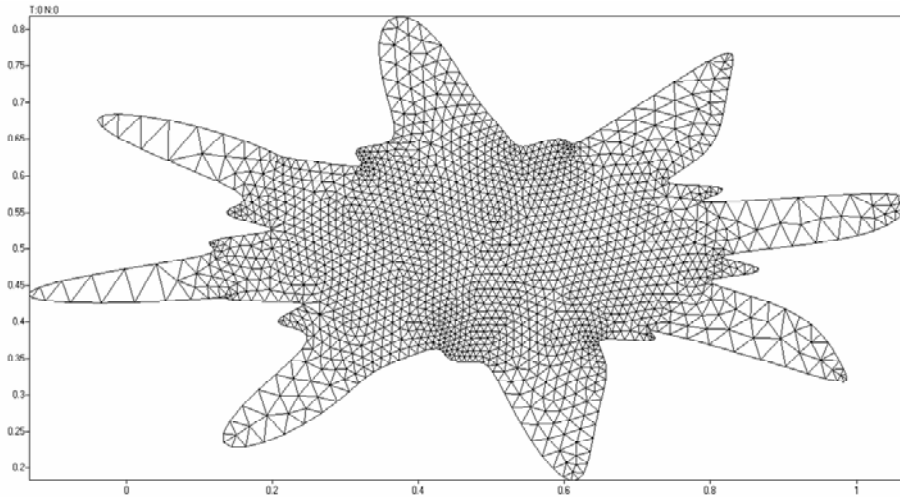


Рис. 14. Сетка из примера 3

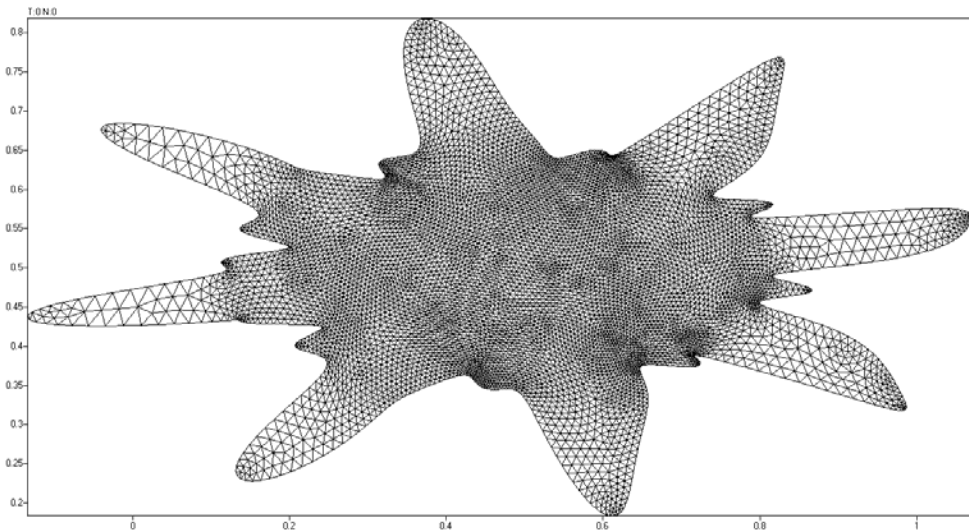


Рис. 15. Сетка из примера 3

## Пример 4

Рассмотрим фрагмент области с границей разбитой неравномерно на рисунке. Задача с сильным перепадом длин ребер является стандартным тестом при тестировании алгоритмов построения сеток. В левой части рис. 16 показано распределение характерного размера. В правой части рис. 16 показано распределение характерного размера. На рис. 17 показан фрагмент сетки в зоне сгущения сетки.

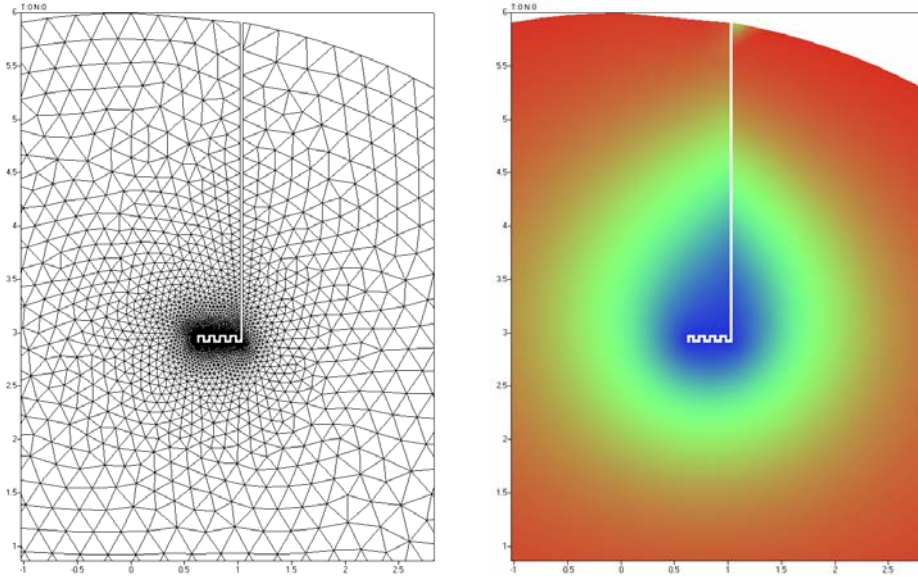


Рис. 16. Фрагмент сетки и поля распределения из примера 4

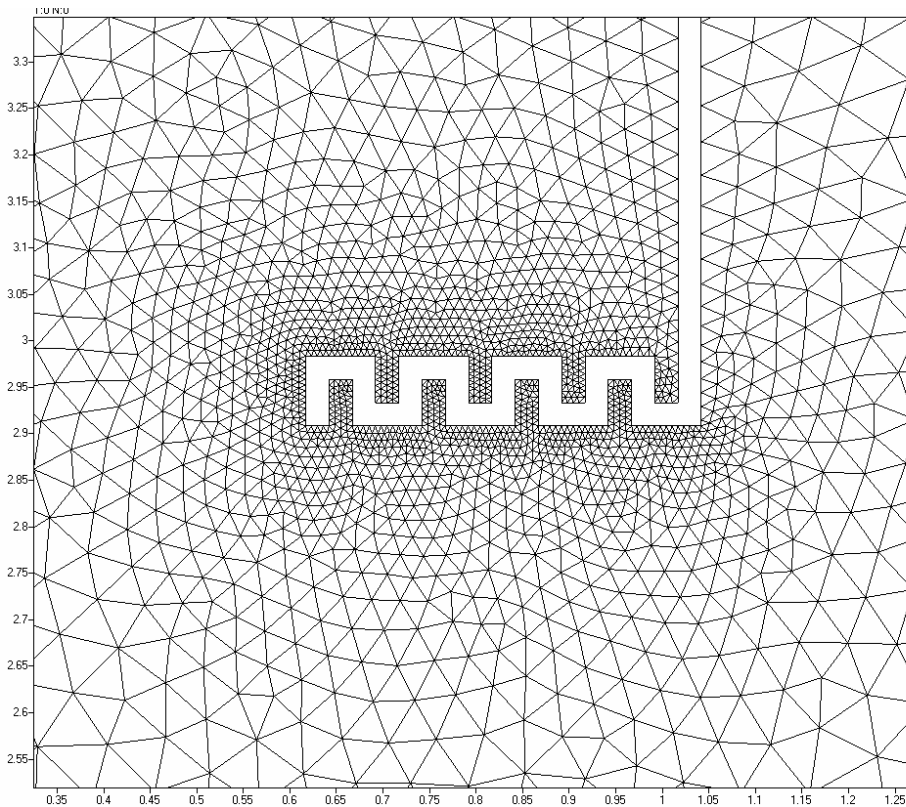


Рис. 17. Фрагмент сетки и поля распределения из примера 4

В статье предложена модификация алгоритма Боуэра – Уотсона (Bowyer, Watson), позволяющая строить качественную сетку в двумерных областях произвольной формы и произвольной связности. Алгоритм был опробован на множестве задач и показал свою работоспособность. В настоящее время программа, в которой реализован данный алгоритм, используется при генерации сетки для решения сложных задач газовой динамики, теплопроводности, подземной гидродинамики. В будущем планируется реализовать возможность учета анизотропии, и реализовать аналогичный алгоритм для трехмерного случая.

1. Bowyer A. Computing Dirichlet tessellations// The Computer Journal. 1981. Vol. 24, N 2. P. 162–166.
2. Watson D. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with applications to Voronoi polytopes// The Computer Journal. 1981. Vol. 24, N 2. P. 167–172.
3. Артемьев А. Ю., Бартнев Ю. Г., Басалов В. Г., Бондаренко Ю. А., Варгин А. М., Голубев А. А., Ерзунов В. А., Ломтев А. В., Максимов А. С., Панов А. И., Прокофьев А. И., Романова М. Д., Фролова Н. В., Щаникова Е. Б. Библиотека решателей разреженных линейных систем // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, Научно-исследовательское издание. Вып. 7. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. С. 80–95.



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ АСТЕРОИДА В ОКЕАН И ПОСЛЕДУЮЩЕГО НАКАТА ВОЛНЫ НА БЕРЕГ

А. В. Абрамов<sup>1,2</sup>, В. П. Елсуков<sup>1</sup>, И. В. Минаев<sup>1,2</sup>, В. А. Симоненко<sup>1</sup>, А. С. Углов<sup>1</sup>, С. Ю. Филатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

<sup>2</sup>ООО «СТРЕЛА» – открытый вычислительный центр, г. Снежинск Челябинской обл.

В настоящее время общепризнанной является опасность для цивилизации, обусловленная столкновением с Землей астероидов. Отдельного внимания заслуживает рассмотрение падения опасных космических объектов в океан. Прежде всего, вероятность падений в океан примерно вдвое выше. Наличие толстого слоя океанической воды порождает новый по сравнению с ударами по суше поражающий фактор – гигантские цунами. Дополнительным стимулом для таких исследований явилось открытие на дне океана в последние годы ряда относительно молодых «ударных» кратеров (рис. 1).

Пятница, 13 апреля 2029 года. Этот день грозит оказаться роковым для всей планеты Земля. В 4:36 по Гринвичу астероид Апофис (рис. 2) массой

50 млн. тонн и диаметром 320 м пересечет орбиту Луны и ринется к Земле со скоростью 45 000 км/ч. По предварительным прикидкам, место падения Апофиса придется на полосу 50 км шириной, пролегающую через Россию, Тихий океан, Центральную Америку и уходит дальше в Атлантику. Наиболее вероятное место падения – это точка в океане в нескольких тысячах километров от западного побережья Америки. В результате, побережье Флориды может попасть под удар волн. По версии NASA, астероид приблизится к Земле на расстояние 325000 км (ближе, чем Луна) и будет виден невооруженным глазом. Вероятность столкновения с Землей составляет 0,002.

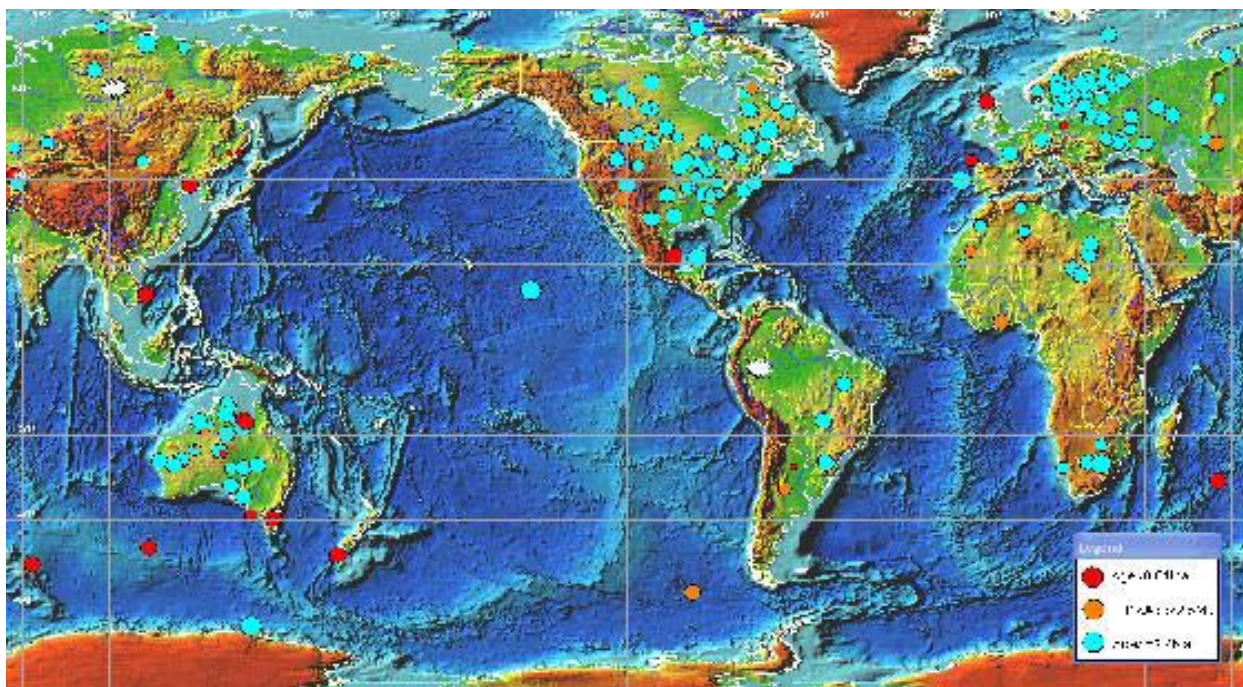


Рис. 1. Карта известных импактных структур

На поверхности суши (180 структур) и на дне морей и океанов (24 структуры). Размер пропорционален диаметру кратера. Цветом показано время образования (возраст в млн. лет) структуры. Белыми звездочками помечены эпицентры Тунгусского (1908г.) и Бразильского (1930 г.) взрывов. 16 из известных морских кратеров были обнаружены в 2005–2006 гг. после начала планомерного целенаправленного поиска подводных импактных структур.



Рис. 2. Астероид Апофис

В настоящее время нет экспериментальной информации о крупномасштабных столкновительных цунами. Поэтому одним из основных инструментов исследований является математическое моделирование. В данной работе рассматривалось падение в океан глубиной 1–6 км каменного астероида диаметром 1 км, сталкивающегося с Землей со скоростью 22 км/с.

Результаты столкновения космических тел с Землей существенно зависят от многих факторов: размера тела, его состава, скорости сближения с Землей и угла входа в атмосферу, от свойств вещества в области падения и т. д.

Движение космического тела в атмосфере сопровождается образованием воздушной ударной волны большой интенсивности. В силу высокой скорости движения тела (15–25 км/с) фронт головной ударной волны в воздухе будет отстоять на незначительном расстоянии от объекта. Поэтому при рассмотрении удара тела о воду, для упрощения расчетной модели присутствием воздуха можно пренебречь.

При столкновении астероида с преградой в ней будут протекать физические процессы: испарение воды, ударное нагружение, плавление и фазовые превращения пород океанического дна, и механическое разрушение дна и астероида. Характерное время динамических процессов в окрестности удара составляет ~ десятки секунд, а характерное время движения волны цунами в океане – несколько тысяч секунд. Рассчитать весь процесс для таких времен с помощью многомерных конечно-разностных или конечно-элементных методик с приемлемой точностью невозможно даже с помощью самых мощных ЭВМ. Поэтому расчет столкновения кос-

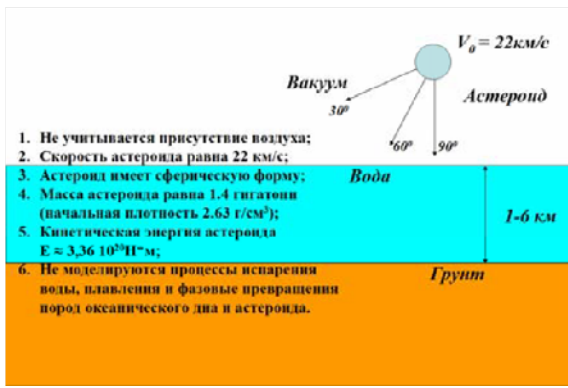
мического тела с преградой, как правило, разбивается на два этапа.

Одна из первых работ в РФ по падению астероида и кометы в океан в двумерной постановке была выполнена в РФЯЦ-ВНИИТФ в 2007 г. [4] в газогидродинамическом приближении с помощью программы МЕЧ – конечно-разностной методики, для угла падения в океан 90 градусов. Используемая программа не позволила просчитать падение космических тел под различными углами, поэтому восполним этот пробел.

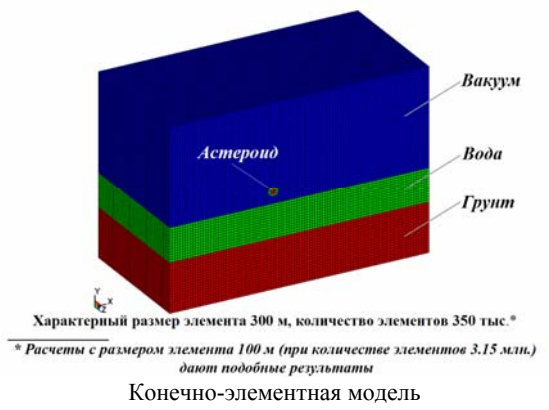
На первом этапе с помощью конечно-элементной программы LS-DYNA [1] на суперкомпьютере СКИФ-УРАЛ Южно-Уральского государственного университета и рабочей станции при поддержке ООО «СТРЕЛА» были рассчитаны процессы взаимодействия космического опасного объекта с преградой.

Взаимодействие вода-астероид моделировалось в МКЭ с применением алгоритма связывания; вода на неподвижной сетке в эйлеровой формулировке, а астероид и грунт – на деформируемой сетке с применением лагранжевой формулировки. Алгоритм связывания позволяет вычислять силы связывания на границе раздела текучей среды с астероидом и грунтом. Данные силы добавляются к текучей среде (эйлеровое пространство) и к узлам астероида и грунта (лагранжевое пространство). Обе задачи решаются с применением явного метода интегрирования по времени, который хорошо подходит для задач импульсного нагружения.

При описании материалов гранита и воды использовались уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена с соответствующими параметрами [2, с. 314–317].



Расчетная схема, принятые допущения



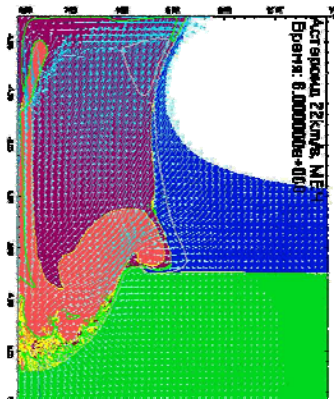
Конечно-элементная модель

Рис. 3. Расчетная схема и конечно-элементная модель

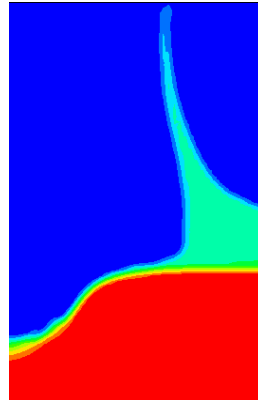
В результате проведенных сопоставлений полученных решений в более общей постановке по программе МЕЧ [4] и использованием программы LS-DYNA на суперкомпьютере СКИФ-УРАЛ, рабочей станции получено удовлетворительное совпадение результатов расчета по высоте волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиусу водяной каверны (рис. 4), что позволяет дальнейшее расчеты проводить по программе LS-DYNA, определяя первоначальные параметры волны столкновительного цунами, с использованием верифици-

рованной конечно-элементной модели. Не моделирование испарения воды, плавление и фазовых превращений пород океанического дна и астероида не привели к существенной погрешности расчета параметров поднятой волны и параметров образовавшегося кратера.

Исследуем правомочность сделанного допущения о возможности не учета в модели воздушных ударных волн. На рис. 5 приведены результаты расчета в программе LS-DYNA с учетом воздуха и без него.

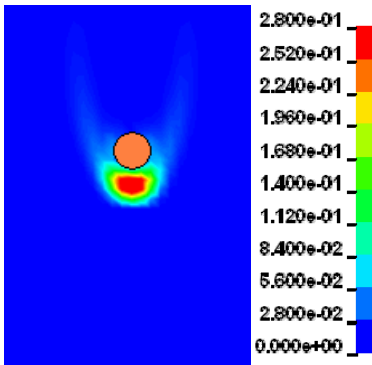


Результаты решения по программе МЕЧ

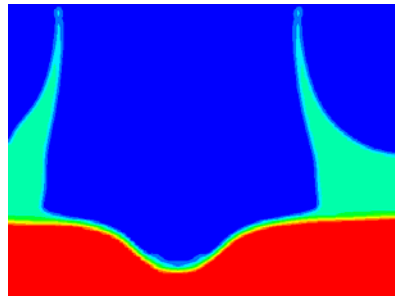


Результаты решения по программе LS-DYNA

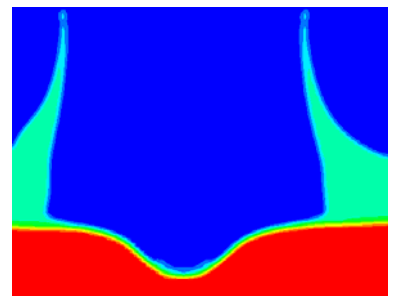
Рис. 4. Результаты верификации созданной расчетной модели



Расположение ударных волн вокруг астероида (ГПа)



Вакуум



Воздух

Рис. 5. Анализ сделанных допущений



Результаты сравнения показывают, что не учет в расчетах атмосферы не приводит к значимой погрешности определения параметров волны и размеров кратера при моделировании падения астероида в океан.

В проводимых расчетах астероид моделируется телом, имеющим сферическую форму диаметром 1 км массой  $M \approx 1,4$  гигатонн, с начальной плотностью  $\rho = 2,63$  г/см<sup>3</sup>. Рассмотрим, как влияет задаваемая форма ОКО на параметры волны и размер кратера. Для этого проведем два расчета, когда ОКО массой  $M \approx 1,4$  гигатонн представляет собой сферу ( $\varnothing = 1$  км), цилиндр ( $\varnothing = 0,6$  км, и высотой 1,85 км) или «шайбу» ( $\varnothing = 1,6$  км, и высотой 0,26 км) падающими в океан со скоростью 22 км/с вертикально.

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера приводятся в табл. 1 и на рис. 6.

Результаты сравнения показывают, что не учет формы ОКО не приводит к существенной погрешности определения параметров волны и незначительно влияет на размеры кратера и водяной каверны. Это можно объяснить тем, что параметры рассматриваемых процессов в основном зависят от кинетической энергии ОКО, а она в рассматриваемых задачах была не низкой равной  $3,36 \cdot 10^{20}$  Н·м.

Продолжим исследования зависимость высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиусу водяной каверны и параметров образовавшегося кратера для разных углов входа астероида в атмосферу Земли. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2 и рис. 7.

Таблица 1

Результаты полученных решений по определению параметров волны и кратера для ОКО в виде сферы, цилиндра и «шайбы»

	Сфера	Цилиндр	«Шайба»
Глубина океана в точке падения астероида, км	4	4	4
Высота волны, м.	9400	9000	9100
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	150	145	180
Диаметр кратера, м	14400	12000	19000
Первичная глубина кратера, м	3300	3900	2100
Диаметр водяной каверны, м	18900	17000	19500

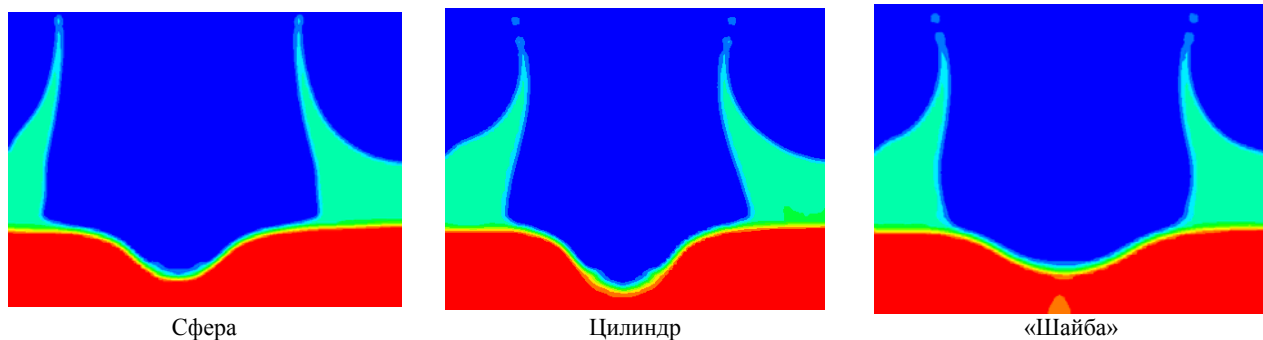


Рис. 6. Изменения параметров волны и размеров кратера для случая падения ОКО

Таблица 2

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера в зависимости от угла входа астероида в атмосферу

Угол падения астероида	30°	45°	60°	90°
Высота волны, м	9200 и 4700	10500 и 6600	9500 и 9200	9400
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	180 и 170	170 и 175	160 и 150	150
Диаметр кратера, м	10500	12300	13000	14400
Первичная глубина кратера, м	1400	2100	2700	3300
Диаметр водяной каверны, м	15000	17400	18600	18900

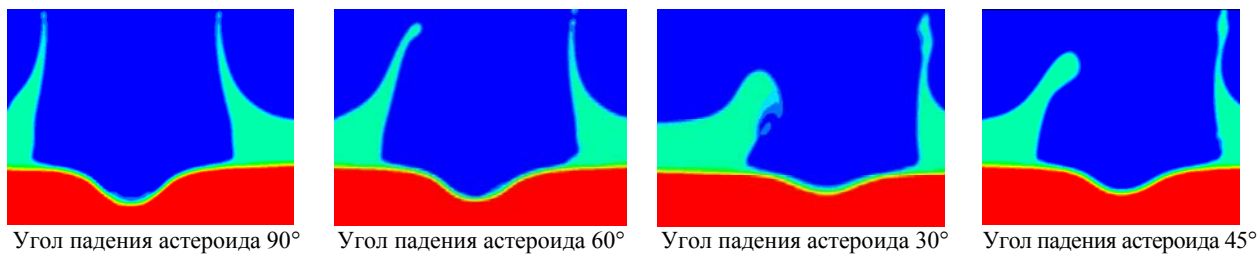


Рис. 7. Изменения параметров волны и размеров кратера в зависимости от угла входа астероида в атмосферу

Анализ расчетных данных показывает, что для углов падения  $60^\circ$  и  $90^\circ$  градусов результаты мало отличаются друг от друга. Даже для угла падения  $30^\circ$  мы не имеем кардинального отличия. Поэтому следует ожидать того, что воздействие на морское побережье столкновительного цунами для рассматриваемых углов соударения, будет практически одинаковым. По этой причине при продолжении исследований было предложено рассматривать только случай осесимметричного внедрения астероида в океан. Первичные параметры образовавшегося кратера с уменьшением угла входа астероида в атмосферу уменьшаются.

Продолжим исследование зависимости высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиуса водяной каверны и параметров образовавшегося кратера от диаметра астероида. Результаты расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 8.

Анализ расчетных данных показывает, что первоначальная высота максимальной волны, горизонтальный компонент скорости ее движения, радиус водяной каверны, первичные параметры образовавшегося кратера с уменьшением диаметра астероида уменьшаются. Астероид диаметром  $0,5$  км на дне не образует значимого кратера.

Исследуем зависимость высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиуса водяной каверны и параметров образовавшегося кратера от глубины океана в точке падения астероида. Результаты расчетов представлены на рис. 9 и в табл. 4.

Анализ расчетных данных показывает, что первоначальная высота максимальной волны, горизонтальный компонент скорости ее движения, радиус водяной каверны сначала возрастают при увеличении глубины океана в точке падения астероида, затем принимают практически одно значение. Первичные параметры образовавшегося кратера с увеличением глубины океана в точке падения астероида уменьшаются.

В результате моделирования в программе LS-DYNA были получены изменения кинетической и внутренней энергии для рассматриваемой задачи падения астероида диаметром в  $1$  км, в океан глубиной  $4$  км. Кинетическая энергия астероида равна  $3,36 \cdot 10^{20}$  Н·м, а энергия поднятой волны составляет примерно  $25\%$  от энергии астероида –  $0,767 \cdot 10^{20}$  Н·м.

Таблица 3

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера для разных диаметров астероида

Диаметр астероида, км	0,5	1	1,5
Высота волны, м	7800	9400	10000
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	100	150	175
Диаметр кратера, м	–	14400	13500
Первичная глубина кратера, м	–	3300	5000
Диаметр водяной каверны, м	9600	18900	18000

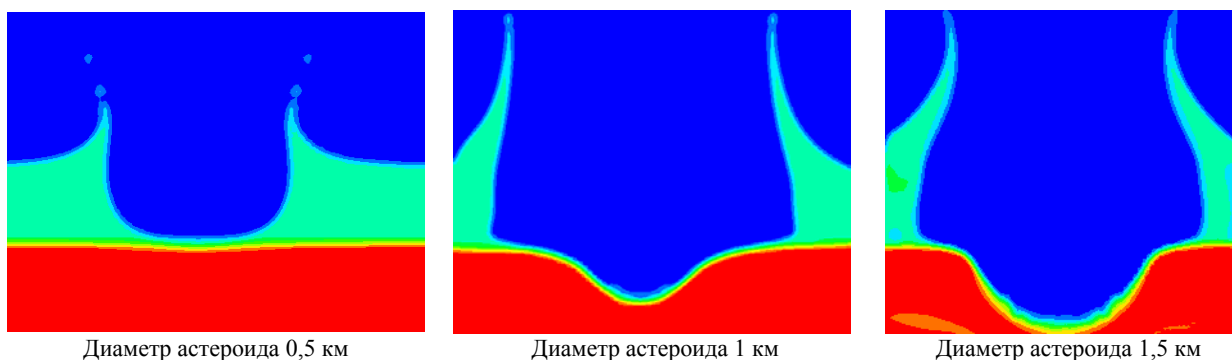
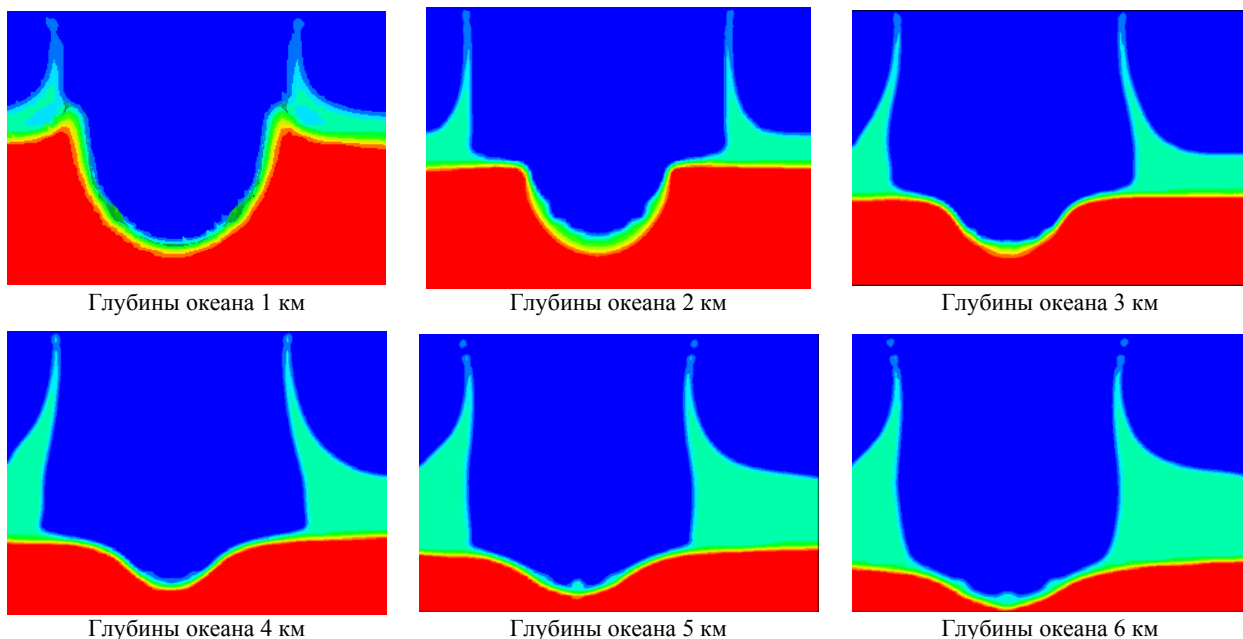


Рис. 8. Изменения параметров волны и размеров кратера для разных диаметров астероида



Глубины океана 1 км

Глубины океана 2 км

Глубины океана 3 км

Глубины океана 4 км

Глубины океана 5 км

Глубины океана 6 км

Рис. 9. Изменения параметров волны и размеров кратера от глубины океана в точке падения астероида

Таблица 4

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера для различных глубин океана в точке падения астероида

Глубина океана в точке падения астероида, км	1	2	3	4	5	6
Высота волны, м	3300	6600	7200	9400	9000	8700
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	220	195	170	150	127	100
Диаметр кратера, м	8400	10200	12300	14400	12900	12700
Первичная глубина кратера, м	6900	4500	3700	3300	3000	2800
Диаметр водяной каверны, м	9000	17700	18400	18900	16800	16700

Анализ расчетных данных показывает, что наибольшие параметры волны получены для случая падения астероида диаметром 1 км в океан глубиной 4 км. Рассмотрим для этого случая параметры образовавшегося цунами.

Волна цунами «чувствует дно» даже в самом глубоком океане; кажется, эта едва заметная последовательность волн представляет движение всего вертикального столба воды (рис. 10).

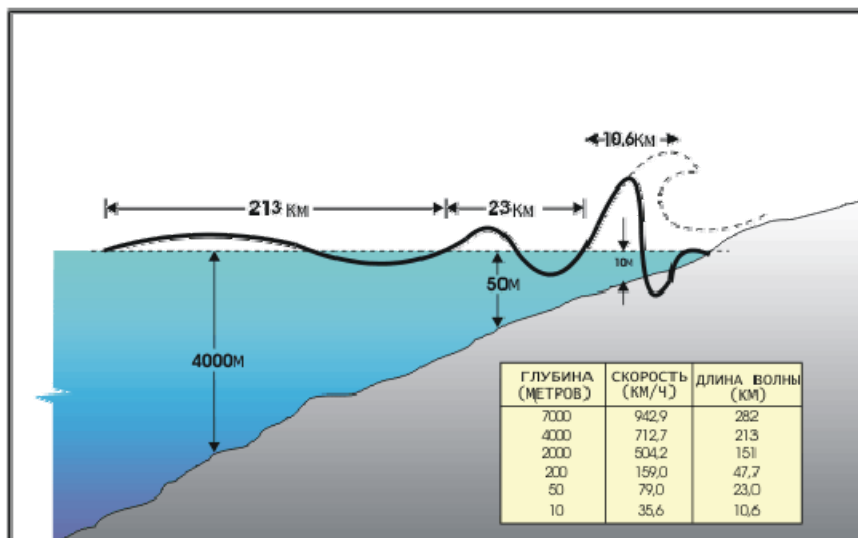


Рис. 10. Трансформация волны цунами

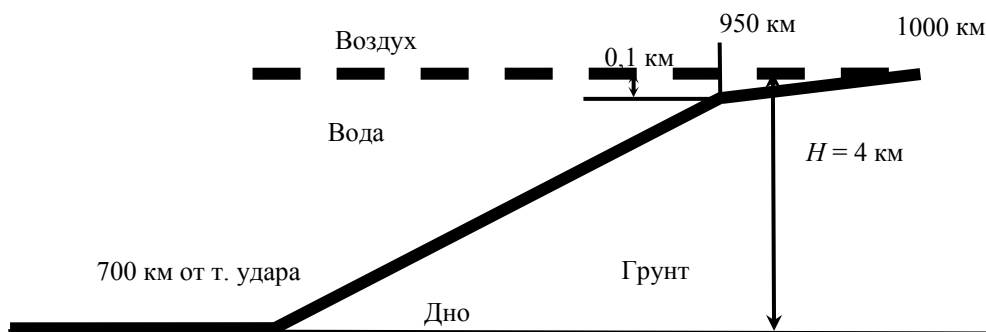


Рис. 11. Рельеф шельфа

Для рассматриваемого нами случая, к концу первого этапа продолжительностью  $\sim 30-50$  с в системе «океан-скала» все существенно нелинейные процессы закончились: затухли ударные волны, сформировалась зона кратера, а сам астероид разрушился. На поверхности воды сформировалась волна высотой  $\sim 8 \dots 10$  км и диаметром воронки  $\sim 15 \dots 20$  км. Плотность воды стала равной  $\sim 1,0 \dots 1,1$  г/см<sup>3</sup>, вектор скорости движения частиц среды в слое воды стал почти горизонтальным и приблизительно постоянно по глубине воды. Разброс величины модуля скорости по глубине не превосходит 15 %.

Известно, что в случае, когда длина волны, распространяющейся по поверхности воды, значительно больше глубины океана, ее распространение можно рассчитывать по теории мелкой воды. Очевидно, что в рассматриваемой задаче данное условие будет выполнено для достаточно больших времен. В рассматриваемом случае на момент времени  $t = 35$  с длина поверхностной волны сравнима с глубиной океана. Тем не менее, для оценки распространения поверхностной волны на втором этапе расчетов была использована классическая теория мелкой воды. Принятые параметры шельфа и дна показаны на рис. 11.

Цифрами 700 и 1000 км отмечены расстояния от точки входа астероида в океан до начала шельфа и до береговой линии соответственно.

Для описания цилиндрически расходящейся волны цунами и ее воздействия на побережье с учетом профиля шельфа океана была разработана специальная программа, в которой реализовано приближение мелкой воды [3]. Уравнения теории мелкой воды, описывающие распространение одномерной круговой поверхностной волны, имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial R} = g \frac{\partial \eta}{\partial R}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial R} + \xi \left( \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{u}{R} \right) = 0.$$

Здесь  $R$  – расстояние от начала координат (точка входа тела в воду), расположенного на невозмущенной поверхности океана;  $t$  – время;  $g$  – ускорение свободного падения;  $u = u(R, t)$  – скорость поверхно-

стной волны;  $\eta = \eta(R, t)$  – профиль поверхностной волны;  $\xi = h(R) + \eta(R, t)$ ;  $h(R)$  – профиль дна мирового океана.

Уравнения (1) являются уравнениями гиперболического типа и для них можно применять известные конечно-разностные аппроксимации.

Своеобразием рассматриваемой задачи является то, что распространение поверхностной волны осуществляется на очень большие расстояния  $\sim 1000$  км. Время распространения составляет величину порядка нескольких тысяч секунд. Это означает, что при численном решении уравнений приходится делать большое число циклов по времени. Поэтому конечно-разностные уравнения, аппроксимирующие уравнения (1), должны обладать минимальным сглаживающим эффектом.

Были опробованы схемы Мак-Кормака, Лакса-Вендроффа, Неймана. Все они оказались неудовлетворительными. Заслуживающей внимания оказалась конечно-разностная  $\lambda$  – схема Моретти, которая при аппроксимации дифференциальных уравнений использует информацию о характеристиках уравнений (1). Схема Моретти не нуждается в использовании искусственной вязкости, дает монотонные профили, в ней практически нет численной диссипации. Однако прямое использование  $\lambda$  – схемы Моретти давало решения, физически неправдоподобные. Поэтому была выполнена модификация (Н. А. Скоркиным)  $\lambda$  – схемы, которая сохранила все положительные свойства исходной схемы Моретти. С помощью этой модифицированной схемы были решены задачи о распространении поверхностной волны на большие расстояния.

Чем больше время перехода с программы LS-DYNA на расчет по теории мелкой воды (программа SWAT), тем меньше погрешность такой аппроксимации задачи.

В качестве исходных данных для кода SWAT задается профиль волны и воронки в грунте, т. е. распределения высоты волны  $\eta(R, t)$  и глубины океана  $h(R)$  в зависимости от расстояния  $R$ , отсчитываемого от точки падения тела в воду. На поверхности воды задается распределение горизонтального компонента вектора скорости воды  $V_R(V_X)$  для  $0 < R < 25$  км. Интервал  $0 < R < 1\,000\,000$  м разбивается на частич-

ные интервалы конечно-разностной сетки. Временной интервал тоже дискретизируется с помощью шага счета  $\Delta t$ , выбираемого из условия устойчивого счета по конечно-разностной схеме. На выбранной сетке дифференциальные уравнения мелкой воды заменяются конечно-разностными. На левой границе задачи при  $R = 0$  ставится условие для скорости  $V_R = 0$ . На правой границе при  $R = 1000$  км тоже  $V_R = 0$ . Задача считается до прихода волны к береговой линии океана.

Для расчета натекания воды на берег уравнения SWAT'a автором программы записаны относительно полной глубины  $H(R, t) = h(R) + \eta(R, t)$  в такой форме, что они становятся справедливыми и для расчета наката воды на сушу. Для численного решения этих уравнений используется та же модифицированная схема Моретти.

На рис. 12 показан водяной султан, образовавшийся в результате затекания воды в донный кратер,

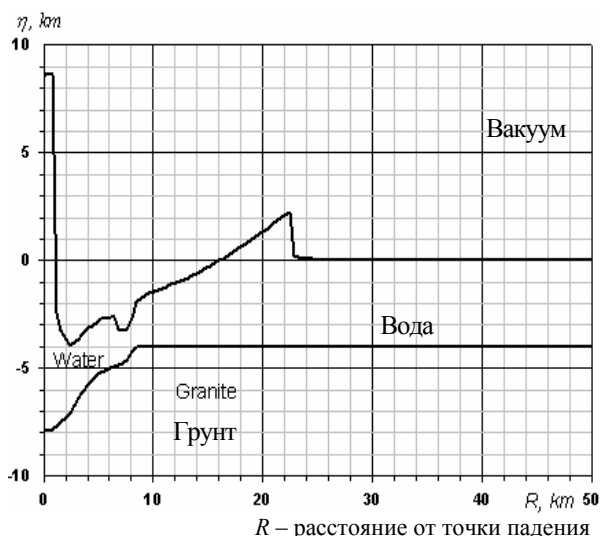


Рис. 12. Водяной султан  $\eta(R)$

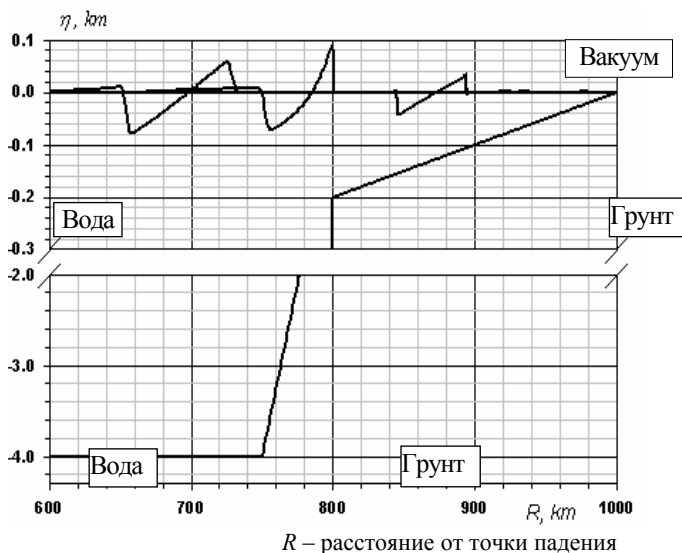


Рис. 13. Выход волны на шельф

на рис. 13 представлено положение цунами на три последовательные моменты времени.

Видно, как на шельфе увеличивается высота волны с 60 м до 100 м. Потом на мелководье происходит уменьшение высоты волны. Это есть ни что иное, как моделирование опрокидывания волны с помощью уравнений теории мелкой воды.

Теперь несколько слов о достоверности проведенных расчетов. В литературе имеются значительные расхождения (2–3 раза) в оценке высоты волны образующейся в результате столкновения астероида с поверхностью океана и высоты волны набегающей на берег.

В работе [5] приведены эмпирические формулы для вычисления высоты удаленной волны, образующейся при подводных ядерных взрывах. В табл. 5 представлены результаты сравнения высоты волны  $\eta(R)$ , вычислений по теории мелкой воды и по эмпирической формуле для различных значений расстояния  $R$  от места падения астероида.

Результаты сравнения высоты волны

$R$ , км	132	850–900
$\eta(R)$ , км – по теории мелкой воды	200	30
$\eta(R)$ , км – из работы [5]	220	21–27

Видно удовлетворительное согласование сравниваемых величин. Это означает, что использование предложенного в данной работе подхода к оценке параметров цунами, образующегося от падения астероида в океан, приемлемо как для качественного, так и для количественного описания данного физического явления. Модифицированная теория мелкой воды позволила провести расчет наката (заплеска) океанической волны на побережье рис. 14.

Расчеты показали, что для полученных параметров волны цунами, образовавшейся от падения в океан глубиной 4 км астероида диаметром 1 км, способно распространиться на берег, имеющий уклон в 32 гра-

дусов, на расстояние в 1,5 км, поднявшись на высоту до 80 м, что является опасным для населенных пунктов вдоль побережья.

Метод расчета наката волны на берег, протестирован сравнением результатов численных расчетов с аналитическими решениями (рис. 15).

На рис. 15 по данным работы [6] приведено сравнение методики расчета наката столкновительного цунами на океанический берег с аналитическим решением (черным цветом – эволюция волны в направлении берега, имеющего наклон 32°; красным цветом – аналитическое решение [6]). Видно удовлетворительное согласование сравниваемых величин.

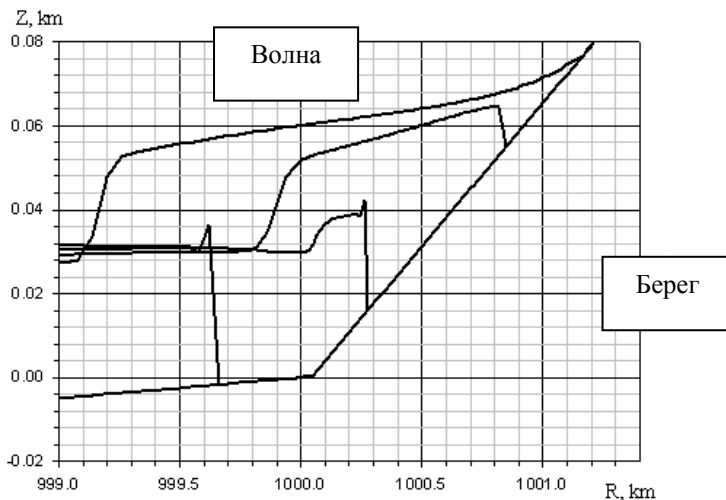


Рис. 14. Расчет наката столкновительного цунами на океанический берег, имеющий наклон 32°

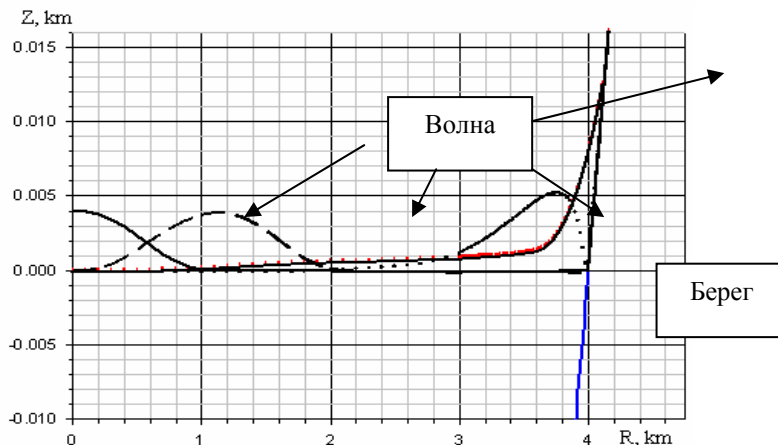


Рис. 15. Тестирование методики расчета наката волны на сушу

Использование предложенного в данной работе подхода к расчету параметров цунами, образующегося от падения астероида в океан, является вполне приемлемым как для качественного, так и для количественного описания данного физического явления. Как показали полученные результаты, последствия от падения каменного астероида могут быть разрушительными для побережья океана.

### Литература

1. [www.cluster.susu.ru](http://www.cluster.susu.ru), [www.strela.snz.ru](http://www.strela.snz.ru).
2. Melosh G. J. Образование ударных кратеров / G. J. Melosh. М.: Мир, 1994. С. 336.

3. Симоненко В. А., Скоркин Н. А. и др. Математическое моделирование мегацунами // Вестник ЮУрГУ, серия «Математика, физика, химия» – 2008. Вып. 11, № 22 (122). С. 62–69.

4. Скоркин Н. А., Домбровская Е. В., Елсуков В. П., Иванкова Т. А., Кутепова С. Г., Симоненко В. А., Углов А. С., Федоров В. В. Математическое моделирование цунами, обусловленных падением астероидов или комет // Доклад на Забабахинских научных чтениях – 2007.

5. Roddy D. J. Computer simulations of large asteroid impacts into oceanic continental sites / D. J. Roddy // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 525–541.

6. Мазова Р. Х. Линейная теория набегания волн на берег // Р. Х. Мазова, Е. Н. Пелиновский / Препринт ИПФ АН СССР. 1981, № 3.



# ПРОГРАММА ПРИЗМА-СВЕТ, РАСЧЕТ ПЕРЕНОСА СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*К. Е. Хатунцев, Д. В. Хмельницкий*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

В настоящее время широкое распространение находят твердотельные лазеры (ТТЛ) с полупроводниковой накачкой. Одним из важных вопросов при разработке ТТЛ с полупроводниковой накачкой является совершенствование их конструкции, направленное на достижение максимальной эффективности поглощения излучения накачки в активном элементе при обеспечении необходимого профиля распределения инверсной населенности по его сечению. Добиться этого можно путем оптимизации геометрических параметров системы и схемы подвода излучения накачки: числа и пространственного расположения источников первичного излучения – лазерных диодов, а также используемых при этом отражателей и их характеристик.

Для решения данной задачи необходимо иметь вычислительные средства, позволяющие рассчитывать распространение светового излучения накачки по объему активного элемента и в окружающем его пространстве. Математическую основу алгоритма расчета такой задачи в точной постановке составляют уравнения Максвелла макроскопической электродинамики для трехмерной неоднородной по составу среды, решения которых представляют большие вычислительные трудности.

Однако, учитывая особенности рассматриваемой системы, а именно линейный характер взаимодействия излучения с веществом и малость длины излучения по сравнению с любыми характерными размерами задачи (линейными размерами самой системы, ее составных частей, волнового фронта и радиуса его кривизны, характерными размерами изменения характеристик среды и самого излучения), можно существенно упростить постановку данной задачи до уровня приближений геометрической оптики и для ее решения использовать метод статистических испытаний – метод Монте-Карло.

Целью данной работы является создание на базе имеющейся в институте программы ПРИЗМА, предназначенной для расчета методом Монте-Карло переноса ионизирующего излучения в неоднородной трехмерной среде, вычислительного инструмента численного моделирования процесса распространения светового излучения и расчета поглощенной энергии в активном элементе твердотельного лазера.

Далее изложены основные положения модели, составляющие физическую основу программы ПРИЗМА-СВЕТ, описания возможностей программы по моделированию геометрии и материального со-

става рассчитываемых систем, источников светового излучения, результатов расчетов – рассчитываемых функционалов. В качестве демонстрации возможностей созданной программы представлены результаты расчетов поглощенной энергии излучения лазерных диодов для двух систем, моделирующих ТТЛ с активным элементом из кристалла YAG:Nd в виде цилиндра и из стекол ГЛС-1 и КГСС-0102 в форме параллелепипеда.

## Физическая модель

Физическая модель процесса распространения светового излучения в среде основана на следующих приближениях [1]:

1. влияние нелинейных эффектов не учитывается в силу малой интенсивности излучения;
2. изменение амплитуды электромагнитного поля на длине световой волны много меньше величины самой амплитуды;
3. изменение показателя преломления на длине волны много меньше его абсолютной величины;
4. линейные размеры волнового фронта световой волны и его радиус кривизны много больше длины волны.

Использование этих приближений [2] позволяет рассматривать распространение излучения в пределе геометрической оптики: энергия электромагнитного излучения распространяется в направлении, нормальном к поверхности фронта волны, в виде лучей, которые представляют собой бесконечные совокупности цилиндров малого радиуса (по сравнению с линейными размерами областей системы). При этом лучи распространяются прямолинейно в пределах каждой однородной области прозрачной ( $\text{Im}(\epsilon) \ll \text{Re}(\epsilon)$ ,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость) среды, не учитываются процессы рассеяния, как изменения волнового вектора. На границе областей происходит преломление и отражение лучей в соответствии с принципом Ферма и законами Френеля [2], а также рассеяние светового излучения (без изменения энергии его квантов), вид законов которого (доля рассеянного излучения и его угловая индикатриса) определяется состоянием поверхности.

На данном этапе развития программы не учитываются процессы рассеяния излучения на границе областей с разными оптическими характеристиками, также как и на зеркальных поверхностях. Также не учитывается направление поляризации светового излучения.

## Статистическое моделирование. Программа ПРИЗМА-СВЕТ

Процесс распространения лучей света можно моделировать как перенос частиц с энергией

$$E[\text{эВ}] = \frac{ch}{n\lambda} \approx \frac{1,242 \cdot 10^3}{n\lambda_{\text{нм}}},$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме, в чисто поглощающей среде (среде без рассеяния и размножения) с макроскопическим сечением поглощения  $\alpha(\lambda)$  или  $\alpha(E)$ . Разыграв достаточно большое число частиц и проследив их истории, можно статистически оценить различные характеристики светового излучения, и в том числе энергию, поглощенную в объеме области.

### Геометрия, состав системы и источник

Для описания геометрии [3] рассчитываемой системы используется понятие блока – часть системы, которую удобнее описывать в собственной (относительной) системе координат. Предусмотрены одномерные, двумерные и трехмерные блоки. Одномерные блоки (плоский, сферический, цилиндрический) характеризуются изменением одной координаты. Двумерные блоки позволяют описывать тела, обладающие осевой или цилиндрической симметрией. В общем случае блок состоит из произвольного числа областей, каждая из которых характеризуется постоянством химического состава. Полное описание области двумерного блока дает описание сечения области в плоскости симметрии; внешний контур сечения может состоять из произвольного набора отрезков прямых, окружностей и эллипсов. Для описания областей трехмерных блоков используется комбинаторный подход.

Согласно физической модели, для описания переноса светового излучения достаточно указать для вещества каждой области значение коэффициента поглощения и значение показателя преломления. В программе ПРИЗМА-СВЕТ для каждой области задается вещество. В настоящее время имеются данные о пяти веществах (см. таблицу).

Список веществ

Обозначения в программе	Вещество
«Н»	Вода
«SI»	Стекло К8
«ND»	Кристалл YAG:Nd
«S»	Силикатное стекло ГЛС-1
«P»	Фосфатное стекло КГСС-0102

Источник может быть точечным, линейным, поверхностным или объемным [4]. Источник может иметь равномерное распределение по объему произвольной геометрической области и площади геометрических поверхностей. Также предусмотрен широкий набор примитивов для автономного описания геометрии источника, в том числе с неравномерным распределением по пространству. Для описания энерго-углового распределения источника предусмотрен широкий набор одномерных распределений. Основным источником первичного излучения света, используемый в лазерных системах, – лазерный диод. Для моделирования лазерного диода в программе ПРИЗМА-СВЕТ разработаны специальные опции.

### Рассчитываемые результаты

В программе ПРИЗМА-СВЕТ производится стандартный расчет результатов, реализованный в программе ПРИЗМА. Основное внимание в программе уделено результату – распределение поглощенной энергии излучения в области.

### Входные и выходные данные

Входные и выходные данные программы ПРИЗМА-СВЕТ с некоторыми исключениями идентичны данным программы ПРИЗМА и представляют собой текстовые файлы определенных форматов. Далее с результатами расчета можно работать с помощью программ Matlab, TreePriz, ViziPrizma.

### Результаты демонстрационных расчетов поглощенной энергии лазерного излучения

Для демонстрации возможностей программы ПРИЗМА-СВЕТ были проведены расчеты пространственного распределения поглощенной энергии излучения накачки лазерных диодов в активном элементе ТТЛ для двух систем.

### Система № 1

Осе-симметричная система (см. рис. 1) находится в вакууме (показатель преломления вакуума  $n = 1$ ) и состоит из активного элемента (АЭ, область 1) – кристалл YAG:Nd, охлаждаемого водой (область 2) и окруженного рубашкой (область 3) из оптического стекла К8 (см. табл.).

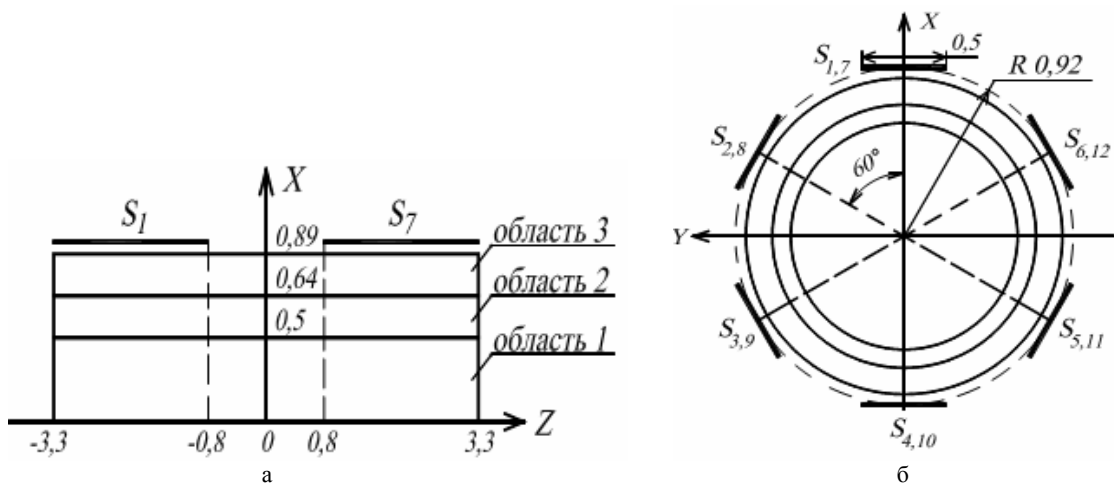


Рис. 1. Расчетная схема системы № 1 (размеры в см)

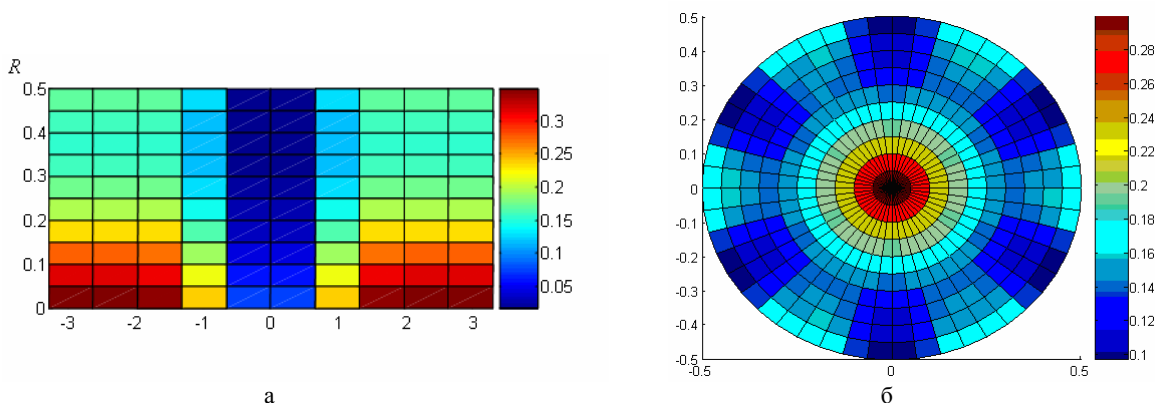


Рис. 2. Распределение плотности поглощенной энергии, усредненное по углу  $\varphi$  (а), график и по оси  $z$  (б) и нормированной на полную энергию излучения лазерных диодов, по сечению активного элемента. Характеристики источника  $\lambda_0 = 809$  нм,  $\sigma\lambda = 5$  нм (размеры в см)

Вокруг системы расположены 12 одинаковых источников светового излучения – лазерных диодов длиной  $a = 2,5$  см, шириной  $b = 0,5$  см, с количеством излучающих линий  $M = 40$ . Спектральный состав излучения задается распределением Гаусса с параметрами  $\sigma\lambda, \lambda_0$ . Угловое распределение источника в форме Гаусса с параметрами  $\sigma_x = 390, \sigma_y = 120$ .

Для расчета распределения поглощенной энергии светового излучения область активного элемента (области 1) разбивалась на  $N = 10 \times 4 \times 48 = 1920$  областей одинакового объема ( $V_i = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ ) с разбиением: по оси  $Z$  равномерно с шагом  $\Delta z = 0,66$  см; по радиусу  $R_i = 0 - 0,25 - 0,354 - 0,433 - 0,5$  см; по углу  $\varphi$  равномерно с шагом  $\Delta\varphi = \pi/24$ .

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

### Система № 2

Система изображена на рис. 3: Активный элемент - параллелепипед размерами  $6,0 \times 6,0 \times 3,0 \text{ см}^3$ , центр нижней грани которого совпадает с началом системы координат. Используемый материал: силикатное стекло ГЛС-1 или фосфатное стекло КГСС-0102 (см. табл.).

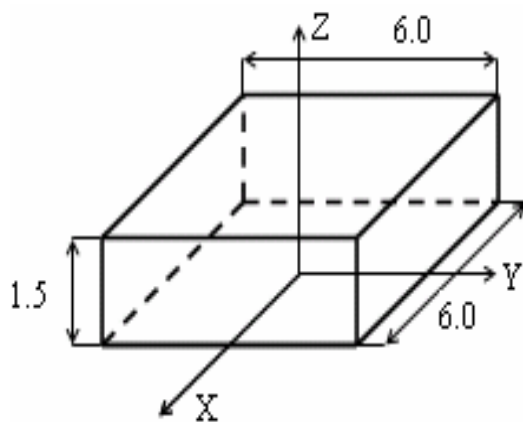
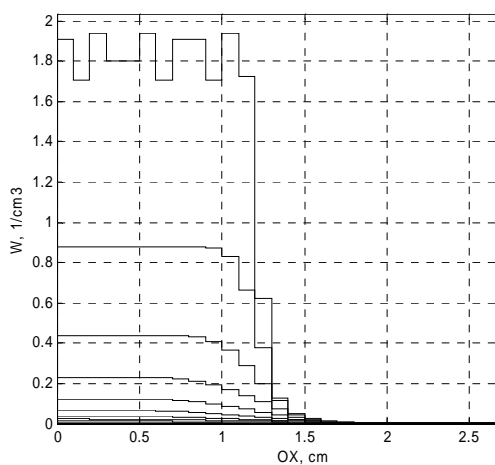


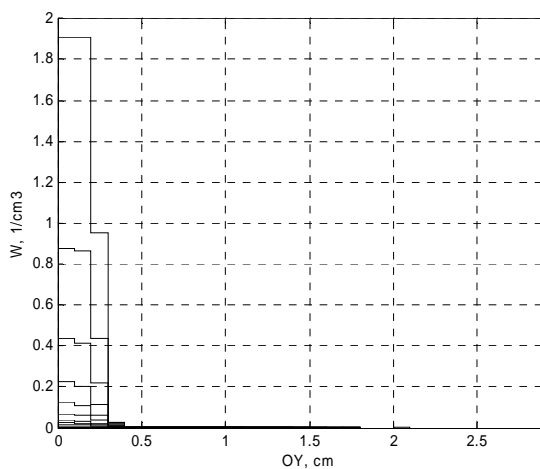
Рис. 3. Расчетная схема системы № 2 (размеры в см)

Рассматривались два вида источников, спектральный состав излучения которых задается распределением Гаусса с параметрами  $\sigma\lambda, \lambda_0$ . Угловое распределение источника излучения такое же, как для системы № 1 ( $\sigma_x = 390, \sigma_y = 120$ ).

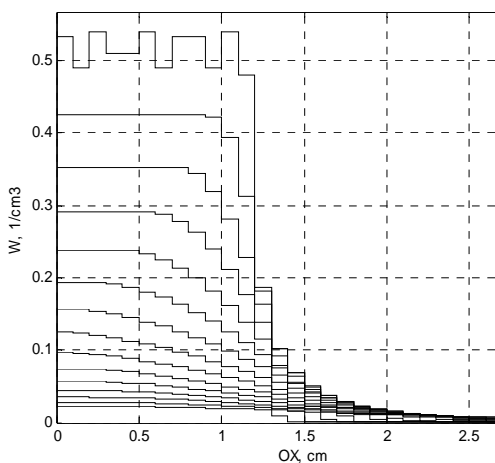
При проведении расчетов объем АЭ разбивался на области: по оси  $Z$  равномерно с шагом  $\Delta z = 0,2$  см; по осям  $X$  и  $Y$  равномерно с шагом  $\Delta x = \Delta y = 0,1$  см.



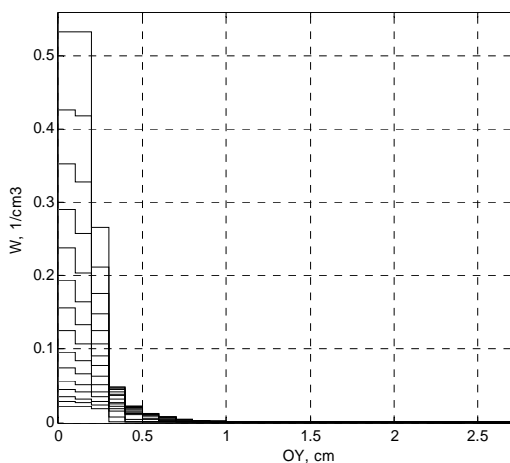
а



б



в



г

Рис. 4. Нормированное распределение плотности поглощенной энергии светового излучения в активном элементе (а, б – стекло КГСС-0102; в, г – стекло ГЛС-1). Области по оси  $X$  (см) при фиксированной координате  $0 < y$  (см)  $< 0,1$ ; области по оси  $Y$  (см) при  $0 < x$  (см)  $< 0,1$ . Кривые соответствуют областям с разными значениями координаты  $z$  (см):  $0 - 0,2 - 0,6 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,4 - 1,6 - 1,8 - 2,0 - 2,2 - 2,4 - 2,6 - 2,8 - 3,0$  (порядок расположения соответствующих кривых сверху вниз)

Результаты расчетов приведены на рис. 4. В силу имеющейся симметрии графики показаны для части АЭ с  $X, Y \geq 0$ .

### Заключение

Оптимизация конструкции ТТЛ с полупроводниковой накачкой путем повышения эффективности поглощения излучения лазерных диодов в активном элементе возможна с использованием программы численного моделирования распространения светового излучения в среде ПРИЗМА-СВЕТ, которая является модификацией программы ПРИЗМА, предназначенной для расчета методом Монте-Карло переноса ионизирующего излучения.

Учитывая основные особенности процесса распространения излучения накачки в ТТЛ: линейный характер взаимодействия излучения с веществом,

малую длину излучения по сравнению с любыми характерными размерами системы, в данной программе в рамках приближения геометрической оптики распространение излучения рассматривается как перенос частиц в чисто поглощающей среде, на границах областей которой происходит отражения и преломления света в соответствии с принципом Ферма и законами Френеля.

Возможности программы продемонстрированы на примере расчета распределения поглощенной энергии излучения лазерных диодов для двух систем с активным элементом в виде цилиндра из кристалла  $YAG:Nd$  и параллелепипеда из стекол ГЛС-1 и КГСС-0102.

В данной версии программы не учитываются процессы рассеяния света на границе областей, дифракции и интерференция, а также поляризация излучения накачки. Поэтому остается вопрос, связанный с корректностью используемой физической модели и полученных результатов. Для ответа на него

необходима верификация созданной программы ПРИЗМА-СВЕТ путем сравнения результатов расчетов по этой программе либо с экспериментальными данными, либо с расчетами по другим программам, например, ZEMAX[6].

### Литература

1. Королев Ф. А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966.

2. Гречин С. Г., Николаев П. П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой. Квантовая электроника, 39, № 1 (2009). С. 1–17.

3. Адеев А. В., Адеева А. В., Павлова Н. П. О геометрическом обеспечении расчетов Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт № 160, РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999.

4. Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н. Описание источников излучений при решении задач переноса методом Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт № 176, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

5. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. «Наука», 1973. С. 73.

6. John Tesar Latest Zemax creates and evaluates designs, Laser Focus World 33 (3), 1997.

# ЗАРОЖДЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ «СВЕРХПРОВОДНИК II РОДА – ФЕРРОМАГНЕТИК» И «СВЕРХПРОВОДНИК I РОДА – ФЕРРОМАГНЕТИК»

Д. В. Цаплин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Существует довольно большой интерес к изучению гибридных S/F структур, связанный с тем, что взаимодействие их подсистем влияет на магнитные и сверхпроводящие свойства таких структур. Вследствие этого возникает множество интересных явлений. Например, появление осцилляций магнитосопротивления и наличие таких особенностей, как пики и пологие участки, в зависимости критического тока сверхпроводника II рода от внешнего магнитного поля в неоднородном магнитном поле ферромагнетика. Эти явления объясняются дополнительным пиннингом вихрей за счет появления центров пиннинга магнитной природы. Притяжение сверхпроводящих вихрей источником неоднородного магнитного поля (например, намагниченным зондом в магнитносиловой микроскопии) делает возможным управление позицией отдельного вихря. Это открывает большие возможности для получения экзотических вихревых состояний. Магнитный пиннинг также является многообещающим методом для увеличения критического тока сверхпроводника.

Множество работ посвящено изучению влияния неоднородного магнитного поля на зарождение сверхпроводимости. Например, оригинальные теоретические работы [1–4], обзорные работы [5–7], а также экспериментальные исследования [8–10]. Это объясняется тем, что гибридная S/F структура обнаруживает нетривиальные особенности линии фазового перехода между сверхпроводящим и нормальным состояниями. Однако в большинстве этих работ рассматривались структуры, у которых ферромагнитная подсистема (периодическая доменная структура или магнитные точки) имеет поперечное направление намагниченности относительно сверхпроводящей пленки, а подсистемам с продольной ориентацией намагниченности уделялось мало внимания. Поэтому в первой части этого доклада изучаются особенности зарождения сверхпроводимости

в поле магнитной полоски или системы магнитных полосок, намагниченность которых направлена вдоль плоскости сверхпроводящей пленки. Эти исследования проводятся с помощью численного решения линеаризованного уравнения Гинзбурга – Ландау, поскольку в начальной стадии формирования сверхпроводимости нелинейными членами можно пренебречь:

$$-\left(\nabla + \frac{2\pi i}{\Phi_0} \mathbf{A}\right)^2 \Psi = \frac{1}{\xi^2} \Psi, \quad (1)$$

где  $\Psi(\mathbf{r})$  – параметр порядка (волновая функция сверхпроводящих электронов),  $\xi(T) = \xi_0 / \sqrt{1 - T/T_{c0}}$  – длина когерентности (характерный масштаб, на котором происходит изменение параметра порядка),  $\xi_0$  – длина когерентности при температуре  $T = 0$ ,  $T_{c0}$  – критическая температура сверхпроводника в отсутствии магнитного поля,  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  – вектор – потенциал магнитного поля,  $i = \sqrt{-1}$  и  $\Phi_0 = \pi \hbar c / e$  – квант потока. Это уравнение с точностью до обозначений эквивалентно уравнению Шредингера для заряженной безспиновой частицы в неоднородном магнитном поле. Решение задачи о спектре электрона в однородном магнитном поле хорошо известно [11] – это набор циклотронных орбит с вырождением по их центрам. Ожидается, что неоднородное поле снимет вырождение, что приведет к появлению наиболее благоприятных мест для зарождения сверхпроводимости.

Вторая часть доклада посвящена исследованию промежуточного состояния сверхпроводника I рода в поле ферромагнитной подсистемы. Это состояние определяется тем, что в образце одновременно присутствуют сверхпроводящие и нормальные области. На рис. 1 изображено промежуточное состояние сверхпроводящей пленки, расположенной перпендикулярно магнитному полю  $B_0$ .

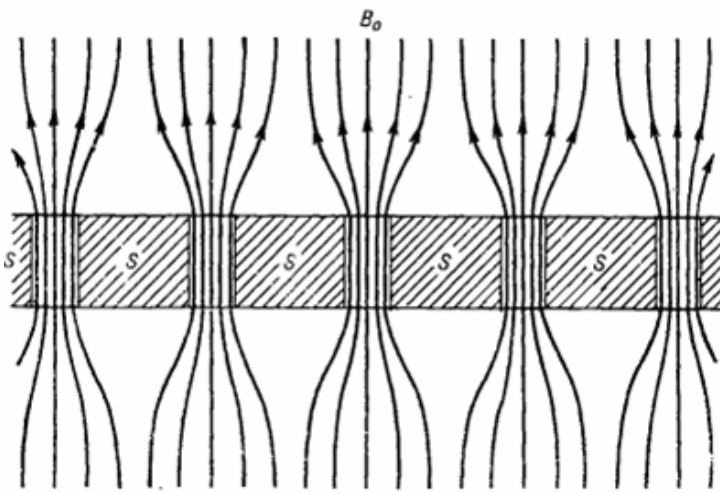


Рис. 1. Промежуточное состояние сверхпроводника. Образец, под действием магнитного поля, разделяется на области нормального и сверхпроводящего состояний

Такое состояние часто возникает при зарождении сверхпроводимости в сверхпроводниках I рода, находящихся в магнитном поле. Основным отличием данной задачи от предыдущей является то, что в образце текут достаточно сильные сверхпроводящие экранирующие токи, магнитное поле которых сравнимо с внешним магнитным полем. Поэтому для нахождения промежуточного состояния образца необходимо решить задачу об экранировке, то есть найти распределение этих токов. Для этого рассмотрим электродинамику сверхпроводящей пленки в неоднородном магнитном поле, созданном ферромагнитной подсистемой, учитывая при этом, что связь между сверхпроводящим током  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  и вектором – потенциалом  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  для чистых сверхпроводников I рода имеет нелокальный характер и дается выражением предложенным Пиппардом [12]:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = -\frac{3n_s e^2}{4\pi\xi mc} \int \frac{\mathbf{R}(\mathbf{R}\mathbf{A}(\mathbf{r}')) \exp(-R/\xi)}{R^4} d\mathbf{r}', \quad (2)$$

где  $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ ,  $n_s = mc^2 / (4\pi\lambda_L^2 e^2)$  – плотность сверхпроводящих электронов,  $\xi$  – длина когерентности,  $\lambda_L$  – лондоновская глубина проникновения магнитного поля,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона. Ожидается, что учет нелокальности приведет к тому, что магнитное поле будет проникать в более широкую область сверхпроводника, по сравнению с локальным пределом, что приведет к увеличению размеров участков нормальной фазы промежуточного состояния.

### Сверхпроводник II рода – ферромагнетик

Рассмотрим гибридную структуру, состоящую из тонкой пленки сверхпроводника II рода и ферромагнитной подсистемы. В качестве последней вые-

рем либо одну магнитную полоску с продольной ориентацией намагниченности, либо периодическую последовательность из таких полосок (рис. 2). Сверхпроводящая пленка имеет толщину  $d$  и ширину  $w$ . На высоте  $h$  от нее расположена магнитная полоска со следующими параметрами: толщина –  $b$ , ширина –  $a$  и намагниченность –  $\mathbf{M}$ . Координатные оси выбраны так, как показано на рисунке. В направлении оси  $Oy$  вся система бесконечна. Также на эту структуру может быть наложено внешнее однородное магнитное поле  $\mathbf{H}_{ext}$  параллельное оси  $Oz$ , при этом поле будем полагать достаточно малым, чтобы не влиять на магнитную структуру ферромагнетика.

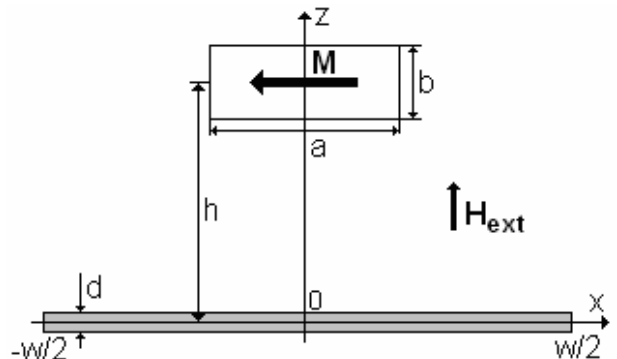


Рис. 2. Гибридная структура сверхпроводник II рода – ферромагнетик

Условие того, что сверхпроводящая пленка тонкая, то есть  $d \ll h, a, b, w, \xi(T)$ , где  $\xi(T)$  длина когерентности сверхпроводника, позволяет считать магнитное поле и векторный потенциал постоянными по толщине пленки. Поэтому будем искать решение линеаризованного уравнения Гинзбурга – Ландау (1) в виде:  $\psi(x, y) = f_k(x) e^{-iky}$ . Вводя безразмерные переменные следующим образом:



$$\tilde{x} = \frac{x}{h}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{h}, \quad \alpha = \frac{a}{2h}, \quad \beta = \frac{b}{2h}, \quad H = \frac{H_{ext}}{2M},$$

$$m = \frac{4\pi h^2 M}{\Phi_0}, \quad \tilde{k} = kh, \quad E = \frac{h^2 \left(1 - \frac{T}{T_{c0}}\right)}{\xi_0^2}, \quad (3)$$

получим:

$$-\frac{d^2 f_k}{d\tilde{x}^2} + \left(m(A(\tilde{x}) + H\tilde{x}) - \tilde{k}\right)^2 f_k = E f_k, \quad (4)$$

где

$$A(\tilde{x}) = \int_0^\infty d\tilde{y} \ln \left\{ \frac{\left(\tilde{x} + \alpha + \sqrt{(\tilde{x} + \alpha)^2 + \tilde{y}^2 + (1 + \beta)^2}\right) \left(\tilde{x} - \alpha + \sqrt{(\tilde{x} - \alpha)^2 + \tilde{y}^2 + (1 - \beta)^2}\right)}{\left(\tilde{x} - \alpha + \sqrt{(\tilde{x} - \alpha)^2 + \tilde{y}^2 + (1 + \beta)^2}\right) \left(\tilde{x} + \alpha + \sqrt{(\tilde{x} + \alpha)^2 + \tilde{y}^2 + (1 - \beta)^2}\right)} \right\} \quad (5)$$

– безразмерный векторный потенциал магнитного поля, создаваемого ферромагнитной полоской с продольной ориентацией намагниченности. Граничные условия, обеспечивающие отсутствие сверхпроводящего тока через границу сверхпроводника, примут вид:

$$\left. \frac{df_k}{d\tilde{x}} \right|_{\tilde{x}=\pm \frac{w}{2h}} = 0. \quad (6)$$

Если же выбрать граничные условия вида

$$f_k \Big|_{\tilde{x}=\pm w/(2h)} = 0, \quad (7)$$

препятствующие появлению зародыша сверхпроводящей фазы на границах пленки, то можно исследовать влияние неоднородного магнитного поля на зарождение сверхпроводимости, пренебрегая поверхностными эффектами, то есть, считая пленку безграничной в плоскости  $xу$ . Очевидно, что критическая температура  $T_c$ , отвечающая началу зарождения сверхпроводимости, соответствует минимальному собственному значению  $E_{min}$  уравнения (4). Таким образом, получаем задачу о нахождении собственных значений этого уравнения, для решения которой используем разностный метод с постоянным шагом сетки [13].

Значение параметра  $m = 1$  выбирается, исходя из характерных намагниченностей насыщения типичных материалов с продольной намагниченностью, таких как Fe, Co, Ni, взятых из справочника [14]. Теперь выберем ширину сверхпроводящей пленки. Для этого рассмотрим решение уравнения (4) в отсутствие ферромагнитной подсистемы и с граничными условиями (7). Решением будет зародыш сверхпроводя-

щего состояния, локализованный в центре пленки и имеющий форму

$$f(x) = \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2}{2\xi^2} \right], \quad (8)$$

где величина  $\xi = \sqrt{\Phi_0/2\pi|H_{ext}|}$  играет роль его ширины, в безразмерном виде она выглядит так:  $\xi = 1/\sqrt{m|\tilde{H}|}$ . Заметим, что при уменьшении величины поля размер зародыша растет, и может стать сравнимым с шириной пленки  $\xi \approx w$ . Это приведет

к тому, что границы будут влиять на размер зародыша и уменьшать критическую температуру. Поэтому ширина пленки должна быть большой, чтобы влияние границ существенно не сказывалось на зависимости  $E_{min}(H)$ . С другой стороны, затраты времени на компьютерный счет растут с увеличением ширины пленки. Чтобы сделать наиболее оптимальный выбор, на рис. 3 непрерывной линией изображена зависимость минимального собственного значения  $E_{min}$  уравнения (4) с граничными условиями (7) от ширины пленки  $w/h$  в однородном магнитном поле, величина которого равна  $H = 0,1\tilde{H}_{c2}$ , где  $\tilde{H}_{c2} = E/m = E$  – безразмерное выражение для верхнего критического поля (максимальное поле, при котором могут образовываться зародыши сверхпроводимости внутри большого образца):

$$H_{c2} = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi^2(T)}. \quad (9)$$

Точечная линия соответствует теоретически подсчитанному значению  $E_{min}$  для бесконечной в плоскости  $xу$  пленки.

Из этого рисунка можно сделать вывод, что, начиная с ширины сверхпроводящей пленки  $w/h = 20$  и выше, значения  $E_{min}$  практически не отличаются друг от друга. Поэтому наиболее оптимальной шириной пленки будет  $w/h = 20$ . Значение толщины магнитной полоски будем считать постоянным и равным  $\beta = b/(2h) = 0,5$ , а параметр  $\alpha = a/(2h)$ , отвечающий ее ширине, будем менять для получения кривых фазовых переходов в зависимости от различного распределения неоднородного магнитного поля.

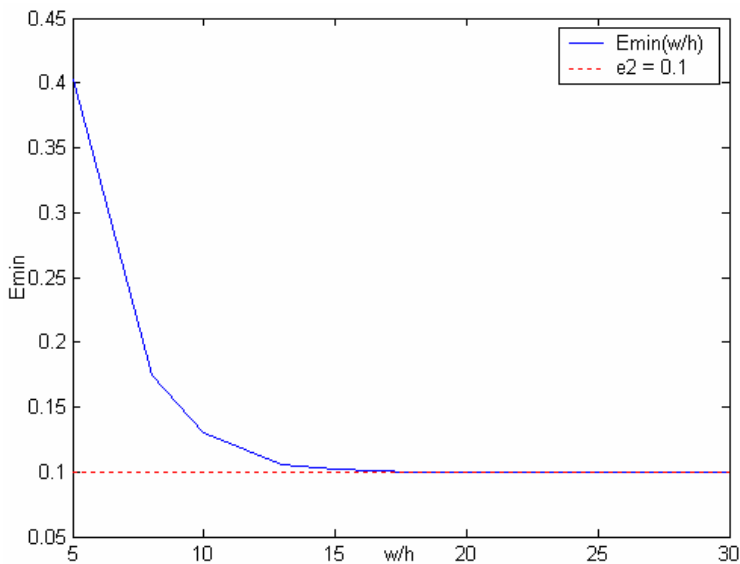


Рис. 3. Зависимость минимального собственного значения  $E_{\min}$  уравнения (4) с граничными условиями (7) от ширины сверхпроводящей пленки  $w/h$  в однородном поле (непрерывная линия). Точечная кривая – теоретически подсчитанному значению  $E_{\min}$  для бесконечной пленки

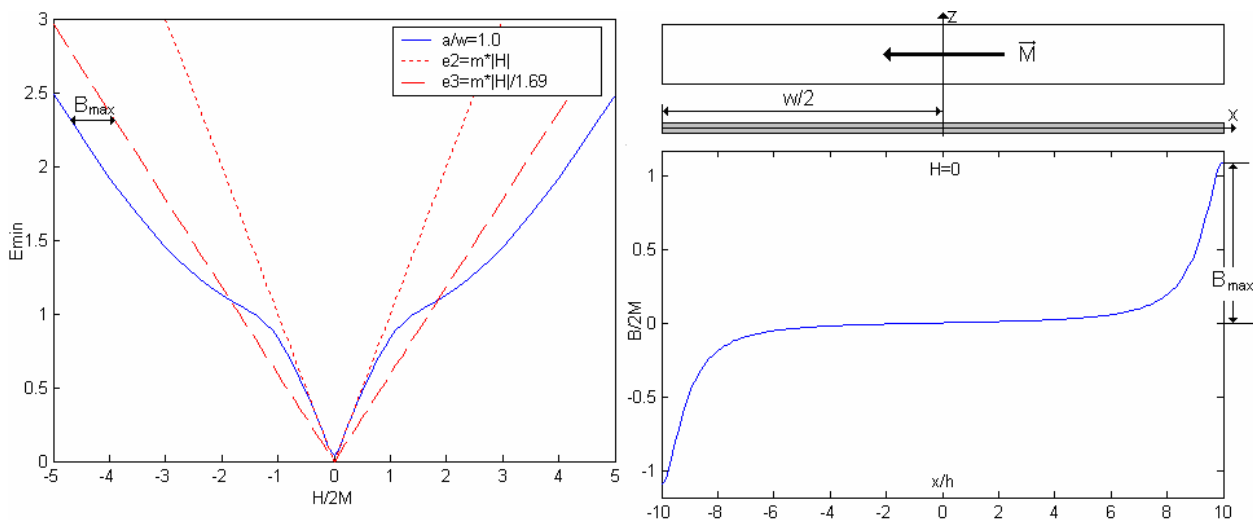


Рис. 4. На левой части рисунка изображена зависимость  $E_{\min}(H)$  для  $a/w=1,0$  (непрерывная линия) вместе с аналогичными зависимостями, соответствующими объемному и поверхностному зарождениям сверхпроводимости в однородном магнитном поле (точечная и пунктирная линии). На правой части рисунка изображена гибридная структура и распределение  $B_z$

В случае, когда ферромагнитная подсистема состояла только из одной магнитной полоски, были получены различные линии фазового перехода в зависимости от соотношения ширины магнитной полоски и сверхпроводящей пленки  $a/w$ . Наибольший интерес вызывает кривая  $E_{\min}(H)$  при  $a/w=1,0$ , изображенная на левой части рис. 4 непрерывной линией. Для сравнения, на этом же рисунке приведены точечная и пунктирная кривые, соответствующие объемному и поверхностному зарождениям сверхпроводимости в однородном магнитном поле. Справа же изображена гибридная структура и распределение проекции магнитного поля ферромагнетика на ось  $Oz$  –  $B_z$  по сверхпроводящей пленке

(поскольку именно поперечная компонента магнитного поля определяет зарождение сверхпроводимости в тонкопленочных структурах) при  $a/w=1,0$ .

Заметим, что при внешних полях  $|H| < B_{\max}$ , где  $B_{\max}$  – максимальное значение неоднородного поля ферромагнетика, поверхностное зарождение сверхпроводимости невыгодно по сравнению с зародышеобразованием в центре пленки, а когда  $|H| > B_{\max}$  зарождение происходит на краях пленки, поэтому зависимость  $E_{\min}(H)$  выходит на асимптотики, параллельные пунктирной кривой, но отстающие от нее на величину порядка  $B_{\max}$ .

Теперь рассмотрим случай, когда ферромагнитная подсистема состоит из периодической последовательности магнитных полосок (рис. 5), расположенных с периодом  $c$ , при этом намагниченности соседних полосок направлены в противоположные стороны. Как видно из распределения проекции неоднородного магнитного поля, изображенного на нижней части этого рисунка, при смене знака величины внешнего поля, условия для зарождения сверхпроводимости будут разными. Поэтому зависимость  $E_{\min}(H)$  для этой гибридной структуры, изображенная на рис. 6 непрерывной кривой, маркирован-

ной кругами, не симметрична. На этом рисунке также приведены асимптотики этой зависимости – точечная и пунктирная кривые, которые получаются смещением линий фазового перехода для объемного и поверхностного зарождений сверхпроводимости в однородном магнитном поле на величину равную амплитуде неоднородного поля. Это позволяет лучше понять смену режимов зарождения сверхпроводимости при изменении величины  $H_{ext}$ . Из рис. 6 видно, что в подобной гибридной структуре существует возвратная сверхпроводимость, то есть немонотонная зависимость  $T_c(H)$ .

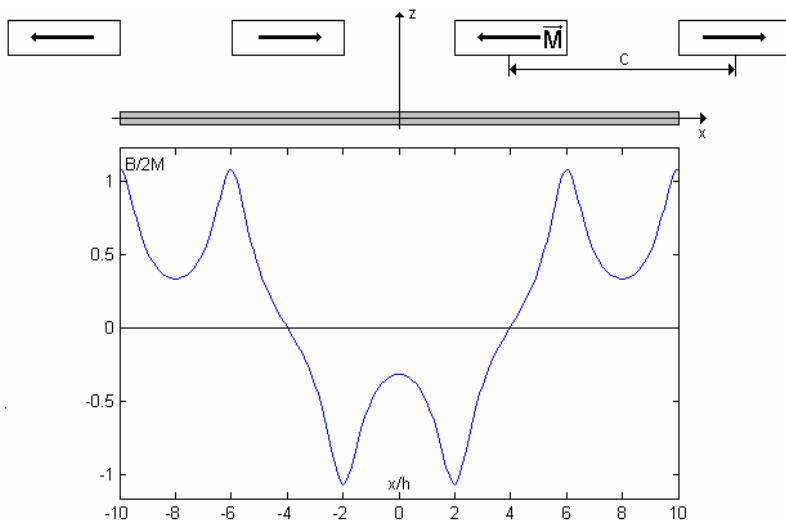


Рис. 5. Схематичное изображение системы (вверху) и распределение проекции магнитного поля на ось  $Oz$  по поверхности пленки (внизу) для случая  $a/w=0,2$ ,  $c/h=4$  и противоположно направленными намагниченностями соседних полосок

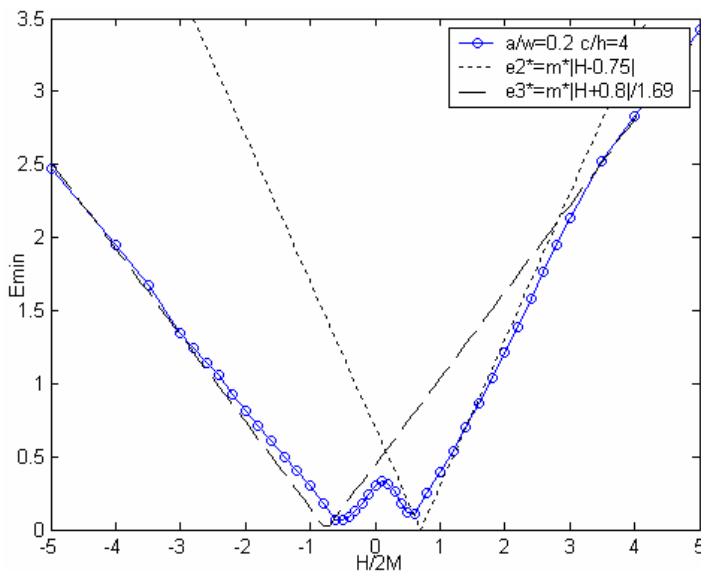


Рис. 6. Зависимость  $E_{\min}(H)$  для гибридной структуры, изображенной на рис. 5 (непрерывная линия, маркированная кругами)

Чтобы не учитывать процесс поверхностного зарождения, рассмотрим сверхпроводящую пленку безграничную в плоскости  $xu$ , в поле периодической последовательности магнитных полосок. Проведем сравнение фазовых кривых для случаев с различной ориентацией намагниченности у соседних полосок, то есть, когда они направлены в противоположные стороны или одинаково (рис. 7), при уменьшении периода ферромагнитной подсистемы. Поскольку, при сближении магнитных линий возникает ситуация, аналогу которой можно привести из квантовой механики, при рассмотрении электрона в двух близко расположенных потенциальных ямах – нижний энергетический уровень частицы в таком потенциальном профиле оказывается ниже, чем в одной изолированной яме, за счет перекрытия волновых функций электрона от соседних ям.

Вследствие описанного эффекта ожидается, что в случае антиферромагнитного упорядочения магнитных полосок при небольших внешних полях собственные значения  $E_{\min}$  будут уменьшаться по сравнению со случаем ферромагнитного упорядочения по мере сближения магнитных полосок. Это предположение подтверждается рис. 8, на котором приведены зависимости  $E_{\min}(H)$  для антиферромагнитной (пунктирная кривая) и ферромагнитной (непрерывная кривая) последовательностей при различном значении периода ферромагнитных подсистем.

Максимум при  $H = 0$  на зависимостях для антиферромагнитного упорядочения объясняется тем, что с уменьшением расстояния между полосками величина суммарного магнитного поля увеличивается, что мешает зарождению сверхпроводимости при небольших значениях внешнего однородного поля.

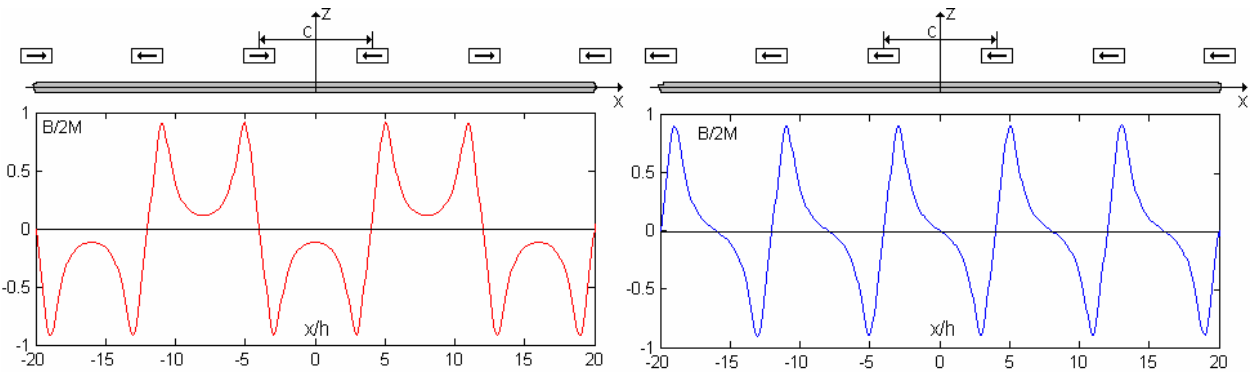


Рис. 7. На левой половине рисунка схематично изображены гибридная структура с антиферромагнитным упорядочиванием соседних полосок и соответствующее распределение  $B_z$ . Справа схематично изображены гибридная структура с ферромагнитным упорядочиванием соседних полосок и соответствующее распределение  $B_z$

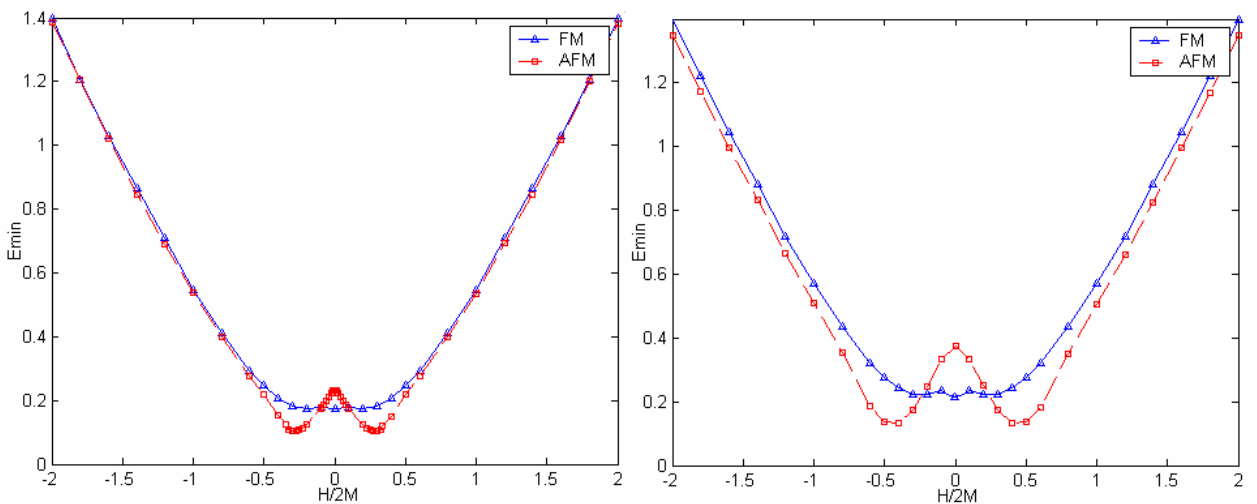


Рис. 8. Сравнение зависимостей  $E_{\min}(H)$  для гибридных структур с различным упорядочиванием ферромагнитной подсистемы. Период подсистемы:  $c/h = 8$  (слева) и  $c/h = 6$  (справа)

## Сверхпроводник I рода – ферромагнетик

Будем решать задачу об экранировке сверхпроводника в неоднородном магнитном поле, созданном ферромагнитной подсистемой, при нелокальной связи сверхтока  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  и вектора – потенциала  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  (2).

Для этого заменим ферромагнетик на провод с током, таким образом, решим базовую задачу о нахождении гриновской функции, которая позволит сделать обобщение на более сложные случаи ферромагнитной подсистемы, например на случай периодической доменной структуры.

Будем рассматривать предельный случай тонкой пленки сверхпроводника (рис. 9).

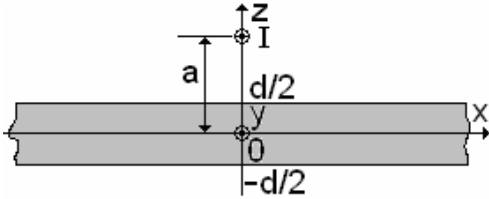


Рис. 9. Тонкая пленка сверхпроводника, находящаяся в магнитном поле провода с током

Оси ориентированы так, как показано на рис. 9,  $a$  – это расстояние, на котором провод с током расположен над пленкой. Ток провода  $\mathbf{I}$  направлен по оси  $Oy$ . Пленка имеет толщину  $d$ .

Используя уравнения Максвелла и нелокальную связь (2), получим:

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mathbf{y}_0 \frac{4\pi}{c} I \delta(x) \delta(z-a) - \frac{3n_s e^2}{\xi m c^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-d/2}^{d/2} \frac{\mathbf{R}(\mathbf{R}(\mathbf{r}'))}{R^4} \exp\left(-\frac{R}{\xi}\right) d\mathbf{r}'. \quad (10)$$

Перейдем к векторному потенциалу  $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$  и выберем калибровку Лондонов  $\text{div } \mathbf{A} = 0$ . Из условий задачи будем считать, что  $\mathbf{A} = A(x, z) \mathbf{y}_0$ , поэтому получим:

$$-\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) A(x, z) = \frac{4\pi}{c} I \delta(x) \delta(z-a) - \frac{3n_s e^2}{\xi m c^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-d/2}^{d/2} \frac{(y-y')^2}{R^4} A(x, z) \exp\left(-\frac{R}{\xi}\right) dx' dy' dz'. \quad (11)$$

Сделаем преобразование Фурье от выражения (11) по координате  $x$ , считая, что векторный потенциал  $A$  не меняется на толщине пленки (приближение тонкой пленки):

$$\left(q_x^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) A(q_x, z) = \frac{2}{c} I \delta(z-a) - \frac{3}{4\pi \xi \lambda_L^2} A(q_x, 0) \delta(z) \times \int_{-d/2}^{d/2} dz \int_{-d/2}^{d/2} dz' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dy dx \frac{y^2}{(x^2 + y^2 + (z-z')^2)^2} \exp\left(-iq_x x - \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-z')^2}}{\xi}\right), \quad (12)$$

где  $q_x$  – Фурье сопряженная к  $x$ . Для того чтобы упростить это выражение рассмотрим два предельных случая: (а)  $q_x \xi \ll 1$  и (б)  $q_x \xi \gg 1$ . В этих пределах интеграл в выражении (12) принимает свои асимптотические выражения, которые запишем следующим образом:

$$\left(q_x^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) A(q_x, z) = \frac{2}{c} I \delta(z-a) - A(q_x, 0) G(q_x) \delta(z), \quad (13)$$

где функция  $G(q_x)$  имеет различный вид, в зависимости от того, какой предельный случай рассматривается:

$$\text{а) } G(q_x) = -\beta \ln(\xi/d)/\xi, \quad \text{б) } G(q_x) = \beta \ln(|q_x|d)/\xi, \quad \text{где } \beta = 3d^2/(4\pi \lambda_L^2). \quad (14)$$

Разобьем пространство на три области:  $a < z$ ,  $0 < z < a$ ,  $z < 0$ , и в каждой решим уравнение

$$\left(q_x^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) A(q_x, z) = 0, \quad (15)$$

а затем «сошьем» на границах областей полученные решения. В результате получим распределение  $A(q_x, z)$  во всем пространстве. Для нахождения Фурье-образа сверхпроводящего тока, текущего по пленке, используем граничное условие на поверхности  $z=0$  для вектора – потенциала:

$$\mathbf{j}_{sur}(q_x) = \mathbf{y}_0 \frac{c}{4\pi} \frac{\partial}{\partial z} \left( A^{(0 < z < a)}(q_x, z) - A^{(z < 0)}(q_x, z) \right) \Big|_{z=0} = -\mathbf{y}_0 \frac{I}{\pi} \frac{1}{(1-2|q_x|/G(q_x))} \exp(-|q_x|a). \quad (16)$$

Сделаем обратное преобразование Фурье от выражения (16):

$$j_{sur}(x) = -\frac{I}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-q_x a) \cos(q_x x)}{(1-2q_x/G(q_x))} dq_x. \quad (17)$$

Рассмотрим два предельных случая. Первый из них предполагает, что провод с током находится достаточно высоко над пленкой ( $a/\xi \gg 1$ ), чтобы магнитное поле, созданное им, было почти однородным у поверхности пленки, поэтому влияние нелокальности будет очень мало и выражение для плотности сверхпроводящего тока должно допускать асимптотическое решение, совпадающее с локаль-

ным пределом. Второй предельный случай предполагает, что провод с током расположен близко к поверхности пленки ( $(a/\xi \ll 1)$ ), поэтому магнитное поле сильно неоднородно, и влияние нелокальности существенно. Определим, как нелокальность повлияет на промежуточное состояние сверхпроводника. Для этого, считая, что провод с током находится на фиксированной высоте над пленкой  $a=1$ , сравним распределения сверхпроводящего тока по ее поверхности при различных значениях длины когерентности. Результат этого сравнения приведен на рис. 10.

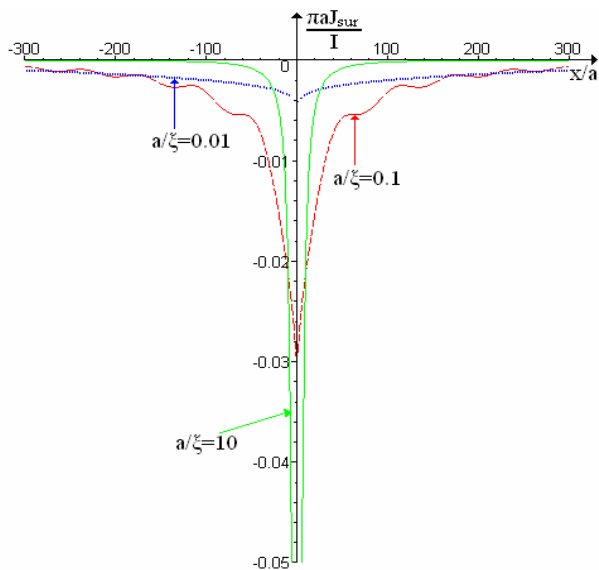


Рис. 10. Сравнение распределений поверхностного тока по сверхпроводящей пленке в случаях различных соотношений  $a/\xi$ , при  $a/d = 100$ ,  $\beta = 0,01$

На нем непрерывная кривая соответствует локальному случаю  $a/\xi = 10$ , а пунктирная и точечная кривые соответствуют нелокальному случаю, но с различными длинами когерентности  $a/\xi = 0,1$  и  $a/\xi = 0,01$ . Из этого рисунка можно сделать вывод о том, что в нелокальном случае распределение сверхпроводящего тока становится более широким, что может привести к увеличению нормальной области в образце, однако уменьшается амплитуда этого распределения. При этом с уменьшением отношения  $a/\xi$ , то есть с увеличением нелокальности, описанный процесс проявляется более явно. Заметим, что распределение сверхтока в нелокальном случае осциллирует. Период этих осцилляций определяется отношением  $\xi/a$ .

### Заключение

В существующей литературе, посвященной исследованию особенностей зарождения сверхпроводимости в гибридных структурах «сверхпроводник II рода – ферромагнетик», основное внимание уделя-

лось структурам, у которых ферромагнитная подсистема имеет поперечную, по отношению к плоскости сверхпроводящей пленки, ориентацию намагниченности. Поэтому в данной работе рассматривался процесс зарождения в неоднородном поле, создаваемом различными конфигурациями магнитных полосок с продольной ориентацией намагниченности. Во-первых, было показано, что в подобных гибридных структурах можно реализовать возвратную сверхпроводимость, то есть немонотонную зависимость критической температуры от внешнего поля  $T_c(H)$ . Во-вторых, для пространственно ограниченных систем была изучена смена наклонов зависимости  $T_c(H)$  вследствие влияния различных механизмов зарождения.

Вторая часть доклада посвящена исследованию промежуточного состояния сверхпроводника, вызванного магнитными полями рассеяния от ферромагнитной подсистемы, в гибридных структурах «сверхпроводник I рода – ферромагнетик». Для этого была решена базовая задача о нахождении гриновской функции для сверхпроводящих токов экранировки в поле провода с током, учитывая, что связь сверхтока и векторного потенциала магнитного поля имеет нелокальный характер. Было показано, что в нелокальном случае существуют осцилляции распределения этого тока, при этом был оценен период этих осцилляций. Было так же установлено, что нелокальность приводит к тому, что магнитное поле проникает в более широкую область сверхпроводника, что может привести к увеличению нормальных областей в промежуточном состоянии.

### Литература

1. Aladyshkin A. Yu., Fraerman A. A., Mel'nikov A. S., et al. Domain-wall superconductivity in hybrid superconductor-ferromagnet structures. Phys. Rev. B, 68:184508, 2003.
2. Buzdin A. I., Mel'nikov A. S. Domain wall superconductivity in ferromagnetic superconductors. Phys. Rev. B, 67:020503, 2003.
3. Aladyshkin A. Yu., Ryzhov D. A., Mel'nikov A. S., et al. Localized superconductivity and Little-Parks effect in superconductor/ferromagnet hybrids. Phys. Rev. B, 75:184519, 2007.
4. Aladyshkin A. Yu., Mel'nikov A. S., Ryzhov D. A. The Little Parks effect and multiquanta vortices in a hybrid superconductor – ferromagnet system. J. Phys. Cond. Matter 15, 2003.
5. Lyuksyutov I. F., Pokrovsky V. L. Ferromagnet – superconductor hybrids. Adv. Phys, 54:67, 2005.
6. Velez M. et al. Superconducting vortex pinning with artificial magnetic nanostructures. Journ. Magn. Magn. Matter, 320:2547-2562, 2008.

7. Aladyshkin A. Yu. et al. Nucleation of superconductivity and vortex matter in superconductor – ferromagnet hybrids. *Supercond. Sci. Technol.* 22:053001, 2009.

8. Yang Z., Lange M., Volodin A., et al. Domain – wall superconductivity in superconductor – ferromagnet hybrids. *Nature Mater.* 3:793-798, 2004.

9. Yang Z., Vervaeke K., Moshchalkov V. V., et al. Modulation of superconductivity by magnetic template in Pb/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> hybrids. *Phys. Rev. B*, 73:224509, 2006.

10. Fritzsche J., Moshchalkov V. V., Eitel H., et al. Local observation of reverse – domains superconductivity in superconductor – ferromagnet hybrid. *Phys. Rev. Lett.*, 96:247003, 2006.

11. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие для вузов. 4-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. Т. III. Квантовая механика (нерелятивистская теория).

12. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1980. Пер. изд.: США, 1975.

13. Калиткин Н. Н. Численные методы: Учеб. Пособие // Под ред. А. А. Самарского. М. Наука, 1978.

14. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.



# РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МЕТОДИКЕ МИМОЗА С ФОРМИРОВАНИЕМ ОБЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПО ВСЕЙ ЗАДАЧЕ

*Е. Н. Шумкина, А. В. Бабанов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Методика МИМОЗА [1] расчета двумерных нестационарных задач газовой динамики с теплопроводностью может успешно применяться для счета достаточно широкого класса задач на регулярных сетках, как в последовательном, так и в многопроцессорном режиме вычислений.

В настоящее время в программе теплопроводности методики МИМОЗА используется пообластный счет. В каждой счетной области строится своя система линейных алгебраических уравнений. На границе соприкасающихся областей используется схема Кондрашова–Загускина [2]. В расчетах, проводимых преимущественно в многопроцессорном режиме, может нарушаться условие устойчивости разностной схемы Кондрашова–Загускина, что приводит к аварийным остановкам задачи.

Для устранения этого эффекта и возможности безавостного счета было решено отказаться от пообластного счета и реализовать в программе теплопроводности построение и решение единой линейной алгебраической системы по всей задаче.

## Уравнение теплопроводности

Исходное уравнение теплопроводности [3], записанное относительно функции излучения, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(\chi \operatorname{grad} U) + F, \quad (1)$$

где  $E = E(\rho, T)$  – внутренняя энергия;  $\rho$  – плотность;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $U = T^4$ ,  $T$  – температура;  $F$  – источник.

$$\chi = \frac{\sigma c \ell}{3}.$$

Здесь  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $c$  – скорость света;  $\ell(\rho, T)$  – материальный пробег.

## Общая схема решения уравнения теплопроводности

Уравнение теплопроводности (1) решается разностным методом [4]. В счетной области выбирается двумерная регулярная сетка в предположении, что каждая ячейка сетки есть 4-угольник.

Энергии, температуры и плотности берутся в центрах ячеек. Изменение энергии в исходной ячейке происходит за счет потоков через 4 грани ячейки. На рис. 1 приведено схематическое представление расчета потока тепла между двумя ячейками.

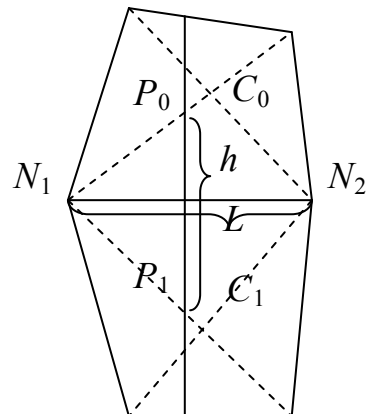


Рис. 1. Схема расчета теплового потока между двумя ячейками:  $C_0, C_1$  – центры ячеек;  $P_0, P_1$  – точки пересечения серединного перпендикуляра с диагоналями соответствующих ячеек

В узлах  $N_1$  и  $N_2$  вводятся дополнительные значения температур. Их определяем арифметическим усреднением температур из четырех соседних ячеек. В точках  $P_0$  и  $P_1$  значения температур рассчитываются линейной интерполяцией по известным значениям в центре и в узле ячейки. Такой способ аппроксимации потоков [5] позволяет получать монотонные решения уравнения теплопроводности на плоских сетках. В результате аппроксимации потоков получается 9-точечная система неявных разностных уравнений.

Также производится линеаризация зависимости внутренней энергии от  $U = T^4$ , и организуются итерации по нелинейности. На каждой итерации по нелинейности записывается и решается система линейных уравнений. Когда итерации сошлись, по уравнению состояния или с помощью схемы предиктор-корректор восстанавливаются значения внутренней энергии в ячейках расчетной сетки.

Для решения системы линейных уравнений применяются решатели из библиотеки PMLP/Parsol [6].

### Построение единой линейной алгебраической системы для решения двумерного уравнения теплопроводности в многообластной постановке

В настоящее время в программе теплопроводности методики МИМОЗА используется пообластной счет. В каждой счетной области строится своя система линейных алгебраических уравнений. На границе соприкасающихся областей используется схема Кондрашова–Загускина [2]. Согласно этой схеме одна из областей объявляется «тяжелой», другая «легкой». Из тяжелой области в легкую передается поток энергии. Из легкой области в тяжелую передается температура.

В ряде расчетов, проводящихся преимущественно в многопроцессорном режиме, может нарушаться условие устойчивости на границе:  $\chi_T < \chi_L$ .

Здесь  $\chi_T$  – коэффициент теплопроводности вещества из тяжелой области;  $\chi_L$  – коэффициент теплопроводности вещества из легкой области.

Для устранения этого эффекта и возможности безавостного счета было решено отказаться от пообластного счета и реализовать в программе теплопроводности построение и решение единой системы линейных алгебраических уравнений по всей задаче.

### Вычисление потоков тепла на границах математических областей

При построении единой системы линейных алгебраических уравнений по всей задаче возможно появление локальной нерегулярности на границах математических областей. Одна ячейка на границе может соседствовать с несколькими ячейками из другой математической области, либо только с одной, но их узлы не совпадают.

Рассмотрим фрагмент расчетной сетки, изображенной на рис. 2, и распишем поток энергии в ячейку с номером  $i$ , который представляется в виде суммы потоков энергии из соседних ячеек:

$$Q_i^{n+1} = Q_{i,k-1}^{n+1} + Q_{i,k}^{n+1} + Q_{i,k+1}^{n+1}. \quad (2)$$

Первое слагаемое в формуле – поток тепла между ячейками с номерами  $i$  и  $(k-1)$ , второе – поток тепла между ячейками с номерами  $i$  и  $k$ , третье – поток тепла между ячейками с номерами  $i$  и  $(k+1)$ .

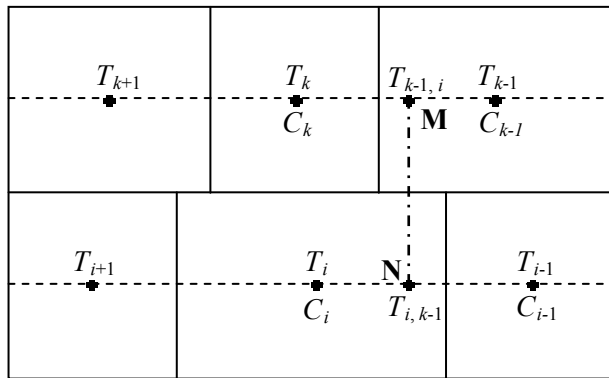


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

Для определенности приведем формулы и алгоритм нахождения потока тепла между ячейками с номерами  $i$  и  $(k-1)$ : через середину совместной границы ячеек с номерами  $i$  и  $(k-1)$  проводим перпендикуляр MN до пересечения с отрезками  $C_i C_{i-1}$  и  $C_k C_{k-1}$  прямых, соединяющих центры ячеек  $i$  и  $(k-1)$ , а также  $(k-1)$  и  $k$  (рис. 2).

Поток энергии в ячейку с номером  $i$  из ячейки с номером  $(k-1)$  находится по формуле:

$$Q_{i,k-1}^{n+1} = \chi \frac{T_{k-1,i}^{n+1} - T_{i,k-1}^{n+1}}{h} L. \quad (3)$$

В этой формуле  $L$  – длина общего ребра ячеек с номерами  $i$  и  $(k-1)$ ,  $h$  – длина срединного перпендикуляра MN.

Значения температур  $T_{i,k-1}^{n+1}$ ,  $T_{k-1,i}^{n+1}$  в точках M и N находим линейной интерполяцией по формулам:

$$T_{i,k-1}^{n+1} = q_{i,k-1} T_i^{n+1} + (1 - q_{i,k-1}) T_{i-1}^{n+1}, \quad (4)$$

$$T_{k-1,i}^{n+1} = q_{k-1,i} T_{k-1}^{n+1} + (1 - q_{k-1,i}) T_k^{n+1}.$$

Здесь:

$$q_{k-1,i} = \frac{r_{MC_{k-1}}}{r_{MC_{k-1}} + r_{MC_k}}, \quad q_{i,k-1} = \frac{r_{NC_i}}{r_{NC_i} + r_{NC_{i-1}}}. \quad (5)$$

По найденным температурам  $T_{i,k-1}^{n+1}$ ,  $T_{k-1,i}^{n+1}$  находятся значения коэффициентов теплопроводности в этих точках:

$$\chi_{i,k-1}^{n+1} = \chi_i \left( T_{i,k-1}^{n+1}, \rho_i \right), \quad \chi_{k-1,i}^{n+1} = \chi_{k-1} \left( T_{k-1,i}^{n+1}, \rho_{k-1} \right). \quad (6)$$

### Алгоритм распараллеливания метода построения единой системы уравнений

При распараллеливании методики МИМОЗА используются следующие основные принципы:

- каждый процесс хранит в памяти и рассчитывает свой фрагмент задачи;

- все массивы величин, зависящие от числа строк и столбцов, подвергаются декомпозиции, и в оперативной памяти каждого процесса хранятся только нужные для этого процесса сечения массивов;

- для внутренних межпроцессорных границ фрагмента существуют фиктивные границы нахлестов на геометрию соседних фрагментов. Величина нахлеста – 2 слоя ячеек.

Особенностью построения единой системы уравнений по всей задаче является вычисление потоков тепла на границах математических областей. Из-за отсутствия у соседних фрагментов, расположенных в разных областях, зоны перекрытия значительно усложняется алгоритм распараллеливания данного метода. Поэтому следовало реализовать выборку и пересылку данных на границе соседствующих фрагментов разных областей. Для расчета коэффициентов единой системы линейных алгебраических уравнений, соответствующих потокам энергии на границах областей, в параллельном режиме используются формулы и алгоритмы, приведенные в предыдущем разделе, только рассматриваемые для части задачи, находящейся в данном фрагменте.

Распараллеливание метода построения единой системы линейных уравнений по всей задаче осуществляется в несколько этапов:

1. Для текущего фрагмента определяется номер процессора соседнего фрагмента и номер области, рассчитываемой на соседнем фрагменте, а также количество ячеек, принадлежащих одной из сторон совместной границы. **Совместная граница** – граница между соприкасающимися фрагментами соседних математических областей.

2. На текущем фрагменте формируются данные для отправки о рассматриваемых ячейках, расположенных на совместной границе. Заполняются массивы номеров, координат узлов ячеек, а также всех термодинамических величин, необходимых для расчета потока тепла.

3. Осуществляется обмен данными между соседними процессорами, расположенными в разных математических областях. Текущий процессор отправляет соседнему процессору информацию о ячейках со своей стороны совместной границы, а от него получает информацию о ячейках, расположенных по другую сторону совместной границы.

После реализации совместных обменов каждый процессор обладает достаточной информацией для расчета потока тепла на границе областей.

## Тестовые расчеты

### Задача о распространении тепловой волны в трехслойной системе под углом к границам веществ

#### Физическая постановка задачи

В начальный момент времени  $t = 0$  трехслойная плоская система [7], изображенная на рис. 3, заполнена веществами с различными теплофизическими свойствами в областях I, II и III. В момент времени  $t = 0$  начинается подвод тепла через отрезки границы АВ и ВС, в результате чего возникает тепловая волна, которая распространяется влево и вверх по системе.

#### Уравнение и параметры веществ

Распространение тепла описывается уравнением нелинейной теплопроводности

$$\rho_i \frac{\partial E_i(T)}{\partial t} = \text{div}[\kappa_i(T) \text{grad}U(T)], \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где  $U(T) = T^4$ ,  $\kappa_i(T) = \kappa_{i0}T^3$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $E_i(T) = C_iT + V_iT^4$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Значения параметров веществ приведены в табл. 1.

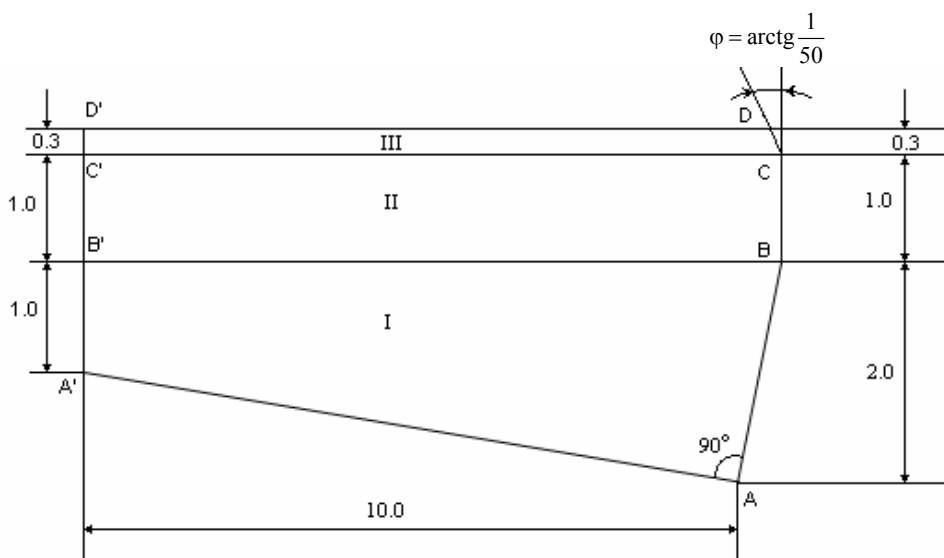


Рис. 3. Геометрия тестовой задачи

Параметры веществ тестовой задачи

Вещество $i$	1	2	3
$\rho_i$	1,0	2,0	10,0
$\kappa_{i0}$	35,3417941268	7,06835882537	0,0706835882537
$C_i$	10,0	1,23762376238	4,952475247524
$V_i$	1,0	0,123762376238	0,4952475247524

*Начальные и граничные условия*

Начальные условия:

- начальное время  $t_0 = 0$ ;
- начальная температура  $T = 0$ .

Граничные условия:

• на граничных отрезках  $AA'$ ,  $A'B'$ ,  $B'C'$ ,  $C'D$ ,  $D'D$ ,  $DC$  поток тепла равен нулю («жесткая стенка»);

• на отрезках  $AB$  и  $BC$  задаются потоки тепла  $Q_1(t, y)$ ,  $Q_2(t, y)$  как известные функции времени и координаты.

Граничные потоки тепла вычисляются следующим образом.

Пусть на данном шаге по времени осуществляется переход с момента времени  $t^n$  на момент времени  $t^{n+1}$ ,  $\Delta t^{n+1/2} = t^{n+1} - t^n > 0$ . За это время через граничную сторону  $[Z_j, Z_{j+1}]$  приграничной ячейки пройдет количество энергии, равное

$$\Delta W(t^n, t^{n+1}, Z_j, Z_{j+1}) = W_i(t^{n+1}, Z_j, Z_{j+1}) - W_i(t^n, Z_j, Z_{j+1}). \quad (8)$$

Поэтому средний поток тепла, прошедший за этот шаг по времени через данную сторону ячейки, будет равен

$$Q_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{W_i(t^{n+1}, Z_j, Z_{j+1}) - W_i(t^n, Z_j, Z_{j+1})}{(t^{n+1} - t^n) S_{j+1/2}}, \quad (9)$$

где  $S_{j+1/2}$  – площадь данной стороны, в плоском случае это длина стороны.

Суммарный поток энергии  $W_i(t, Z_j, Z_{j+1})$  вычисляется по формулам:

$$W_i(t, Z_1, Z_2) = \frac{4\kappa_{i0}\tau_0^7}{7u_i} [a_i(y_1 - y_2) + b_i(x_2 - x_1)] \times \frac{\chi(\theta(\sigma_2)) - \chi(\theta(\sigma_1))}{\sigma_2 - \sigma_1}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (10)$$

$$\sigma_j = -\frac{a_j x_j + b_j y_j - u_j(t - t_0)}{\xi_{0j}}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2, 3; \quad (11)$$

$$\chi(\theta) = \frac{\theta^{10}}{10} - \frac{\theta^7}{7} + \frac{\theta^4}{4} - \theta + \frac{1}{6} \ln \frac{(\theta+1)^2}{\theta^2 - \theta + 1} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{2\theta - 1}{\sqrt{3}} \right). \quad (12)$$

Функция  $\theta(\sigma)$  определяется уравнением

$$\theta^3 - \ln(1 + \theta^3) = 3\sigma, \quad \sigma > 0; \quad (13)$$

$$\theta = 0, \quad \sigma \leq 0.$$

Если  $\sigma_2 - \sigma_1 \approx 0$ , то есть  $|\sigma_2 - \sigma_1| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – малое положительное число (например,  $10^{-7}$ ), то можно использовать приближенную формулу

$$W_i(t, Z_1, Z_2) \approx \frac{4\kappa_{i0}\tau_0^7}{7u_i} [a_i(y_1 - y_2) + b_i(x_2 - x_1)] \times \frac{(\theta(\sigma_2))^7 + (\theta(\sigma_1))^7}{2} = \frac{4\kappa_{i0}}{7u_i} [a_i(y_1 - y_2) + b_i(x_2 - x_1)] \times \frac{(T_i(t, x_1, y_1))^7 + (T_i(t, x_2, y_2))^7}{2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (14)$$

$$|\sigma_2 - \sigma_1| \leq \varepsilon \sim 10^{-7}.$$

*Результаты расчетов в последовательном режиме*

Расчет проводился в трехобластной постановке на трех типах сеток:

- *первая сетка* – равномерная по обоим направлениям в каждой подобласти (в каждом веществе), с равномерным по расстоянию разбиением отрезков  $DD'$ ,  $CC'$ ,  $BB'$ ,  $AA'$  сетка с числом ячеек  $10 \times 10$  в каждой области (рис. 4);

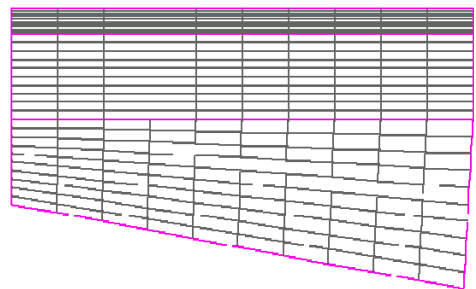


Рис. 4. Расчетная сетка 1

• *вторая сетка* – неравномерная четырехугольная сетка в каждой области. Отрезки  $DD'$ ,  $CC'$ ,  $BB'$ ,  $AA'$  разбивались со своими знаменателями (рис. 5).

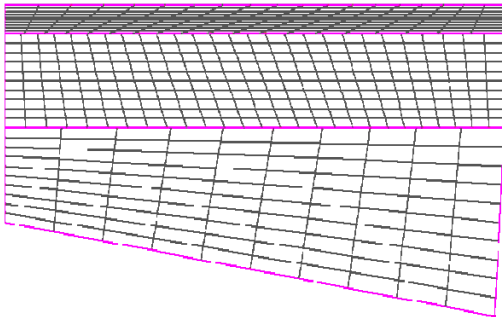


Рис. 5. Расчетная сетка 2

Основной информацией для оценки точности полученного численного решения являются результаты тестовых расчетов на сходимость. Для этого расчеты проводились на каждой из трех сеток с последовательным измельчением ячеек сетки и временного шага в 2 и 4 раза.

На рис. 6–8 приведены результаты расчетов на сходимость, полученные на сетке 1 для каждой области отдельно. На графиках показана зависимость распределения погрешностей в областях от времени.

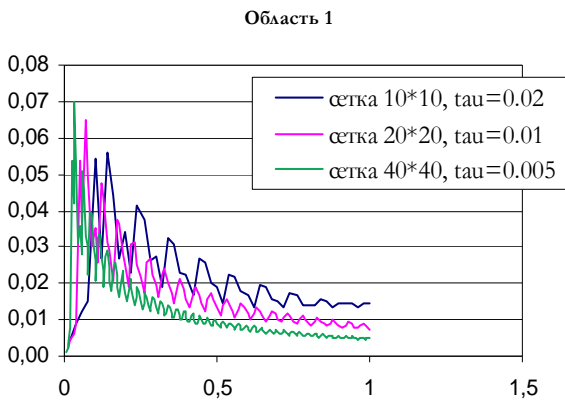


Рис. 6. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 1

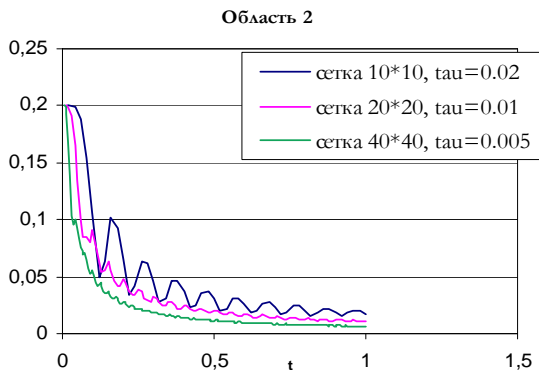


Рис. 7. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 2

Область 3

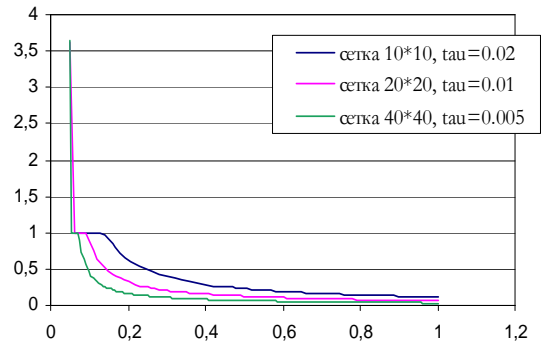


Рис. 8. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 3

На рис. 9–11 приведены результаты расчетов на сходимость, полученные на сетке 2 для каждой области отдельно. На графиках показана зависимость распределения погрешностей в областях от времени.

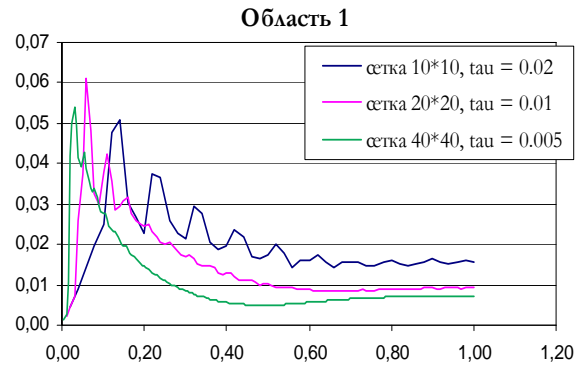


Рис. 9. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 1

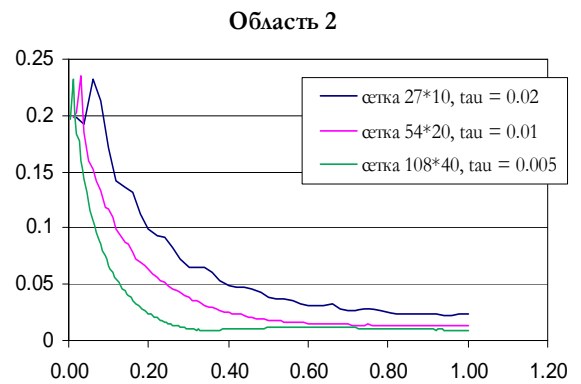


Рис. 10. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 2

В табл. 2 приведены погрешности распределения температуры на момент времени 1 миг для каждой области отдельно. Кроме того, в данной таблице приводятся погрешности распределения температуры в каждой области в случае счета со схемой Кондрашова–Загускина на границах областей.

### Область 3

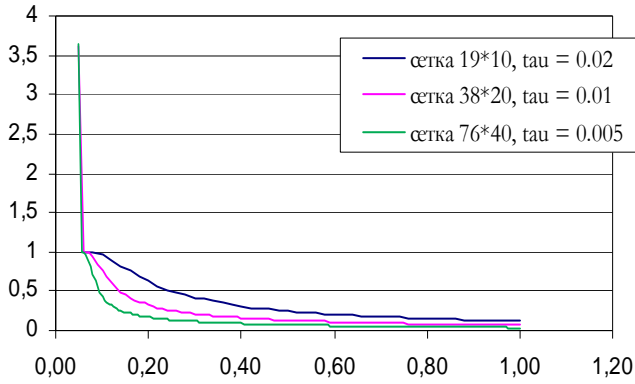


Рис. 11. График зависимости погрешности распределения температуры от времени в области 3

Таблица 2

#### Погрешности распределения температуры в областях в последовательном режиме

Расчетная сетка 1										
Область I	Область II	Область III	Построение единой системы уравнений				Пообластной счет по схеме Кондрашова–Загускина			
			$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$	$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$
10*10	10*10	10*10	0,02	1,44	1,73	11,41	0,02	1,9	1,59	5,83
20*20	20*20	20*20	0,01	0,74	1,12	6,45	0,01	0,97	0,85	2,64
40*40	40*40	40*40	0,005	0,5	0,63	3,38	0,005	0,48	0,54	1,44
Расчетная сетка 2										
Область I	Область II	Область III	Построение единой системы уравнений				Пообластной счет по схеме Кондрашова–Загускина			
			$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$	$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$
10*10	27*10	19*10	0,02	1,55	2,33	12,12	0,02	2,03	1,97	4,41
20*20	54*20	38*20	0,01	0,93	1,32	6,69	0,01	1,14	1,13	2,61
40*40	108*40	76*40	0,005	0,72	0,89	3,69	0,005	0,96	0,78	2,41

#### Результаты расчетов в параллельном режиме

Расчет проводился на равномерной по обоим направлениям и с равномерным по расстоянию разбиением границ разностной сетке, схематично представленной на рис. 12. В каждой области бралось разное количество точек (область 1 – 160\*200, область 2 – 175\*200, область 3 – 200\*200).

В табл. 3 приведены погрешности распределения температуры в областях на момент времени 1 миг. Расчет проводился на 24 процессорах (в каждой об-

ласти 8 процессоров). В табл. 4 приведены результаты расчетов на эффективность распараллеливания.

Реализованный в рамках методики МИМОЗА метод построения единой системы линейных алгебраических уравнений для решения двумерного уравнения теплопроводности продолжает развиваться. В настоящее время произведено обобщение метода на случай, когда граничный участок рассматриваемой области соседствует с любой из границ соседней области.

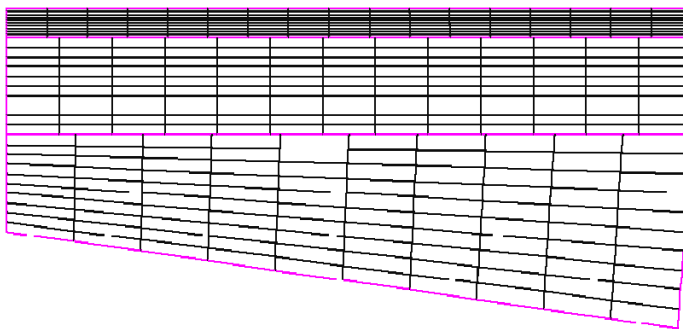


Рис. 12. Расчетная сетка

Таблица 3

Погрешности распределения температуры в областях в параллельном режиме

Построение единой системы уравнений				Пообластной счет по схеме Кондрашова– Загускина			
$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$	$\tau$	$\delta_I(t)$	$\delta_{II}(t)$	$\delta_{III}(t)$
0,00125	0,13	0,34	0,85	0,00125	0,29	0,19	1,31

Таблица 4

Результаты расчетов на эффективность распараллеливания

Кол-во процессоров	Область 1		Область 2		Область 3	
	Кол-во точек	Кол-во процессоров	Кол-во точек	Кол-во процессоров	Кол-во точек	Кол-во процессоров
3	32000	1	35000	1	40000	1
6	32000	2	35000	2	40000	2
12	32000	4	35000	4	40000	4
24	32000	8	35000	8	40000	8
<b>N</b>	<b>Время расчета, с</b>			<b>Эффективность всей задачи, %</b>		
<b>3</b>	<b>757,45</b>			<b>100,0</b>		
<b>6</b>	<b>461,89</b>			<b>82,9</b>		
<b>12</b>	<b>242,25</b>			<b>78,2</b>		
<b>24</b>	<b>124,17</b>			<b>76,3</b>		

### Заключение

В методике МИМОЗА реализован метод построения единой системы линейных алгебраических уравнений для решения двумерного уравнения теплопроводности в многообластной постановке. Успешное решение данной задачи было связано в первую очередь с разработкой эффективного метода расчета потоков тепла на границах математических областей. Реализованный алгоритм построения единой системы уравнений по всей задаче был направлен на устранение эффекта возникновения неустойчивости на границах математических областей при проведении пообластного счета по схеме Кондрашова–Загускина.

Создана параллельная версия программы, позволяющая проводить производственные и методические расчеты с использованием описанного метода на многопроцессорных вычислительных системах с распределенной памятью.

Проведены тестовые расчеты в последовательном и параллельном режимах для проверки работоспособ-

ности созданной в рамках методики МИМОЗА программы решения двумерного уравнения теплопроводности с использованием метода построения единой системы линейных алгебраических уравнений. Полученные результаты показывают хорошее согласие численных расчетов с аналитическим решением и данными, полученными по программе пообластного счета. Кроме того, приводятся результаты расчетов на эффективность распараллеливания описанного метода.

### Литература

1. Софронов И. Д., Афанасьева Е. А., Винокуров О. А., Воропинов А. И., Змушко В. В., Плетнев Ф. А., Рыбаченко П. В., Сараев В. А., Соколова Н. В., Шамраев Б. Н. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ Эльбрус-2 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып. 2. С. 3–9.



2. Загускин В. Л., Кондрашов В. Е. О счете уравнений теплопроводности и газовой динамики прогонкой по отдельным областям. ДАН СССР, 163:5, 1965. С. 1107–1109.

3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Наука, 1966.

4. Самарский А. А. Теория разностных схем. М: Наука, 1977.

5. Софронов И. Д., Винокуров О. А., Змушко В. В., Плетенев Ф. А. Комплекс программ МИМОЗА // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. ВНИИЭФ, Саров, 2000.

6. Артемьев А. Ю., Бартенев Ю. Г., Басалов В. Г., Бондаренко Ю. А., Варгин А. М., Голубев А. А., Ерзунов В. А., Ломтев А. В., Максимов А. С., Панов А. И., Прокофьев А. И., Романова М. Д., Фролова Н. В., Щаникова Е. Б. Библиотека решателей разреженных линейных систем. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров. 2004. Вып. 7. С. 80–95.

7. Бондаренко Ю. А., Воронин Б. Л., Горев В. В., Делов В. И., Зубов Е. Н., Матвеев Ю. М., Моренко А. И., Соколов С. С., Шемарулин В. Е. Описание набора тестов для методик и программ, предназначенных для решения двумерных задач теплопроводности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992, № 2. С. 14–20.

# ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ ДИРИХЛЕ НА ОСНОВЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ ДЛЯ МЕТОДИКИ ТИМ-2D

А. В. Шурыгин, А. А. Воропинов, А. К. Шмелева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Методика ТИМ-2D [1] предназначена для решения задач механики сплошной среды в многообластной постановке на нерегулярных лагранжевых сетках. При этом важным этапом является построение начальной сетки. Одним из используемых в методике ТИМ-2D типов сеток является сетка, состоящая из ячеек Дирихле, которые в общем виде могут быть произвольными выпуклыми многоугольниками.

Построение сетки Дирихле, на основе триангуляции Делоне сводится к генерации набора узлов и построению по нему соответствующей триангуляции Делоне, а затем, формированию сетки из ячеек Дирихле на основе построенной триангуляции.

## 1. Инкрементный алгоритм построения триангуляции Делоне

Все известные алгоритмы для построения триангуляции Делоне можно разделить на два класса:

1. Инкрементные. Они выполняют триангуляцию, начиная с любой внутренней точки или ребра границы триангуляции, пошагово добавляя полученные новые треугольники по одному.

2. Рекурсивные. Эти алгоритмы рекурсивно разбирают заданное множество точек на поднаборы примерно одинакового размера с последующим слиянием полученных данных в необходимый результат.

Каждый класс содержит достаточно большое количество алгоритмов, описание которых можно найти в работе [2].

Рассмотрим более подробно инкрементный алгоритм, наиболее распространенный и достаточно удобный в программной реализации, описанный в работе [3]. Вначале текущая триангуляция состоит из единственного ребра границы области, по окончании работы алгоритма текущая триангуляция становится триангуляцией Делоне. На каждом шаге алгоритм ищет новый треугольник, который подключается к границе триангуляции.

Определение границы зависит от следующей схемы классификации ребер относительно текущей триангуляции. Каждое ребро может быть *спящим*, *живым* или *мертвым*.

*Спящие ребра* – это ребра триангуляции Делоне не обнаруженные алгоритмом.

*Живые ребра* – это ребра, обнаруженные алгоритмом, однако, известна всего одна примыкающая к нему область.

*Мертвые ребра* – это ребра, обнаруженные алгоритмом, для которых известны обе примыкающие стороны.

Вначале живым является единственное ребро, принадлежащее границе области. С одной стороны к нему примыкает неограниченная область, вследствие чего одна область известна. Все остальные ребра считаются спящими. По мере работы алгоритма ребра из спящих становятся живыми, а затем мертвыми. Граница триангуляции на каждом этапе состоит из набора живых ребер.

На каждой итерации выбирается любое ребро  $e$  границы, и оно подвергается обработке, заключающейся в поиске неизвестной области, которой принадлежит это ребро. Если эта область окажется треугольником  $t$ , определяемым концевыми точками ребра  $e$  и некоторой третьей вершиной  $v$  то ребро  $e$  становится мертвым, так как теперь известны обе примыкающие к нему области. Каждое из двух других ребер треугольника  $t$  переводятся в следующее состояние: из спящего в живое или из живого в мертвое. Здесь вершина  $v$  будет называться сопряженной с ребром  $e$ . В противном случае, если неизвестная область оказывается бесконечной плоскостью, то ребро  $e$  просто умирает. В этом случае оно не имеет сопряженной вершины. При этом направление для каждого ребра выбирается таким образом, что неизвестная область для него лежит справа от ребра. Процесс триангуляции Делоне показан на рис. 1, где действие происходит сверху вниз и слева направо. Граница на каждом этапе выделена жирной линией.

Для того чтобы построить первое ребро сначала необходимо найти крайнюю левую точку из всего набора точек. Далее вычисляем угловой коэффициент прямой, которая соединяет первую точку с очередной из всего набора точек по следующей форму-

ле:  $K = \frac{Y_i - Y_1}{X_i - X_1}$ . Второй точкой для ребра будет,

та для которой значение углового коэффициента прямой будет максимальным.

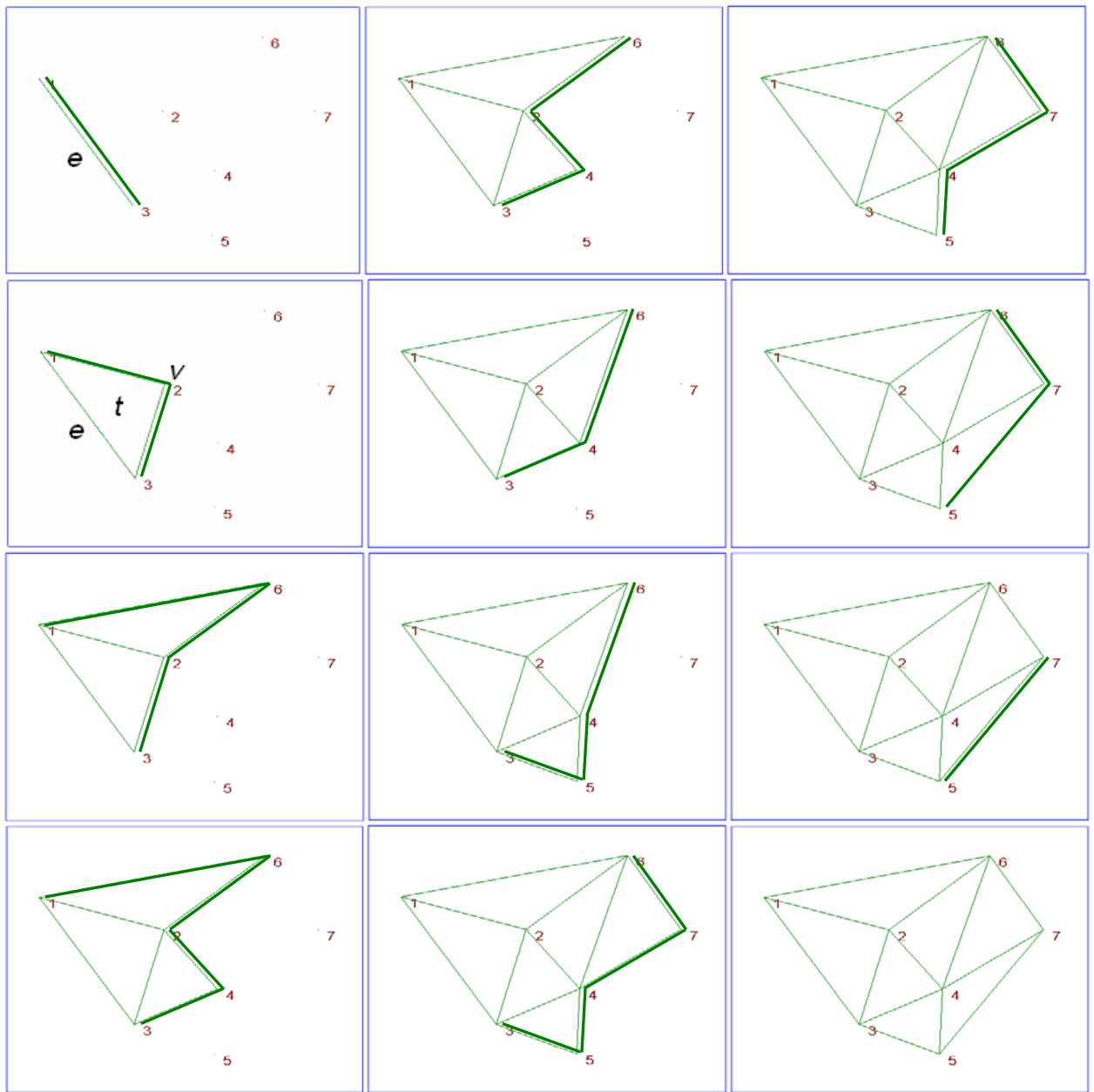


Рис. 1. Процесс построения триангуляции Делоне

В цикле по числу живых ребер происходит поиск сопряженной точки для текущего ребра. Цикл работает до тех пор, пока не останется ни одного живого ребра. Процедура поиска сопряженной точки для ребра выполняется следующим образом:

Сначала проверяется местоположение новой точки относительно текущего ребра:

$$Ax = X_2 - X_1, \quad Ay = Y_2 - Y_1, \quad Bx = X_i - X_1, \quad By = Y_i - Y_1, \\ \text{Sign} = AxBy - BxAy,$$

где  $X_1, Y_1, X_2, Y_2$  – координаты узлов для текущего ребра, а  $X_i, Y_i$  – координаты новой точки.

Если  $\text{Sign} > 0$ , то точка пропускается и далее не обрабатывается. Если  $\text{Sign} \leq 0$ , то находим центр окружности, описанной вокруг этой точки и точек текущего ребра. Для этого необходимо, найти точку пересечения двух серединных перпендикуляров, восстановленных к текущему ребру и ребру, соединяющему один из концов текущего ребра с текущей точкой. Далее вычисляем расстояние  $t$  от центра текущего ребра до центра окружности. Наименьшее значение получаемого параметра  $t$  (рис. 2) при рассмотрении всех расположенных справа от ребра точек (и внутренних, и граничных) указывает на необходимую точку. Ей в данном случае является точка  $D$ .

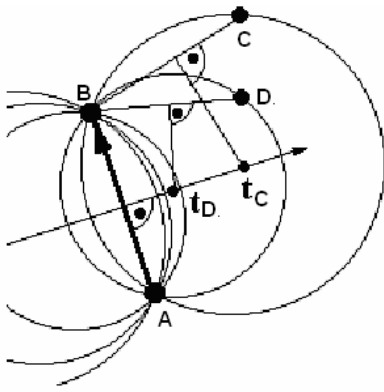


Рис. 2. К определению лучшей точки для триангуляции Делоне ( $t_D < t_C$ )

Если сопряженной точки для ребра не находим, то помечаем текущее ребро как мертвое и продолжаем цикл. Если находим сопряженную точку для ребра, то так же помечаем текущее ребро как мертвое, но при этом формируем два новых живых ребра и новый треугольник. При этом ориентация для нового ребра вводится следующим образом:

- для ребра, соединяющего начало ставшего на данной итерации мертвым ребра и полученной точкой – ориентация от начала к точке;
- для ребра, соединяющего точку с концом ставшего на данной итерации мертвым ребра – ориентация от точки к концу.

Для ребра записываем номера и координаты узлов, из которых оно состоит и номера соседних треугольников. Для треугольников записываем номера и координаты узлов, координаты центров описанных вокруг треугольников окружностей и номера ребер. Эта информация будет необходима при построении сетки Дирихле.

На рис. 3 показан пример построения триангуляции Делоне для 2500 точек, выбранных случайным образом в прямоугольной области. В результате построения образовано 4968 треугольников.

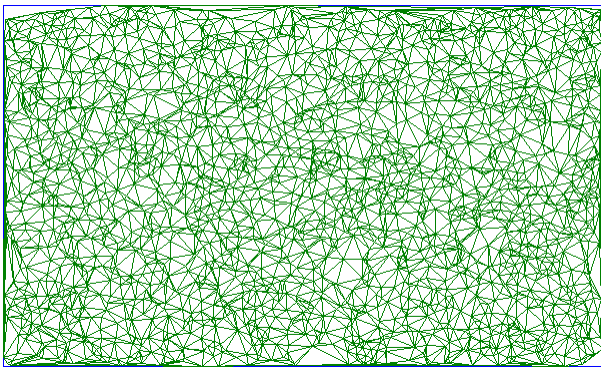


Рис. 3. Пример триангуляции Делоне для 2500 точек, выбранных случайным образом

## 2. Построение сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне

Опишем алгоритм построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне [4].

*Шаг 1.* По исходному множеству точек строим триангуляцию Делоне (см. рис. 4).

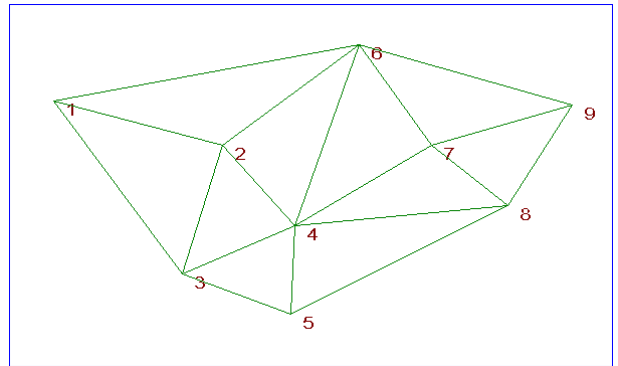


Рис. 4. Триангуляция Делоне, построенная по исходному множеству точек

*Шаг 2.* Для каждого треугольника триангуляции вычисляем координаты центра описанной вокруг него окружности.

*Шаг 3.* Для каждого узла вычисляем центр ячейки Дирихле. Для этого совершаем обход вокруг текущего узла по смежным треугольникам и собираем центры их описанных окружностей. Если узел расположен не на границе триангуляции (узел с номером 4 рис. 5), то таким образом мы получим все координаты соответствующей ячейки Дирихле этого узла (см. рис. 5).

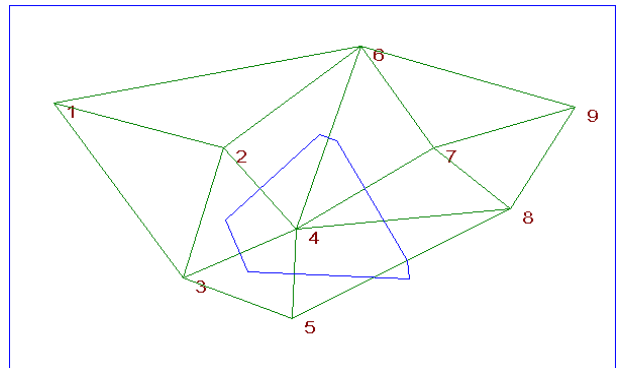


Рис. 5. Построение ячейки Дирихле для внутренних узлов триангуляции

Если узел находится на границе (узел с номером 3 рис. 5), значит, ячейка Дирихле является бесконечной фигурой. Поэтому необходимо в этом случае произвести отсечение двух ее бесконечных сторон границами области (см. рис. 6).

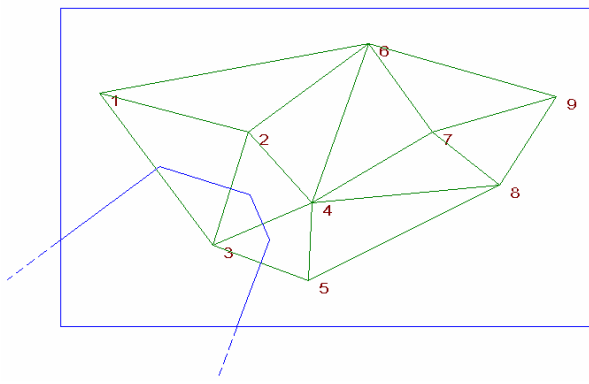


Рис. 6. Отсечение бесконечных сторон ячейки Дирихле границами области

В результате работы данного алгоритма получаем область, заполненную ячейками Дирихле (ячейки отрисованы синим цветом рис. 7).

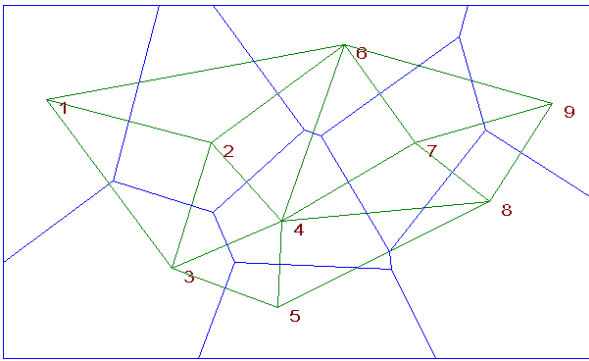


Рис. 7. Область, заполненная ячейками Дирихле

При работе с сеткой было принято использовать информацию об окружении центров окружностей, описанных вокруг треугольников, так как эти центры являются внутренними узлами сетки Дирихле. Причем в каждом узле (кроме угловых) этой сетки сходится ровно три ребра. Для каждого узла список окружающих ячеек и список соседних узлов формируется в порядке обхода против часовой стрелки.

При формировании списка соседних ячеек для узла используем номера вершин текущего треугольника. При формировании списка соседних узлов для узла используем номера соседних треугольников, если соседа не существует, то берем номер узла, получившегося в результате отсечения бесконечного ребра ячейки границей области. Это происходит следующим образом:

- сначала находим уравнение прямой, которая является серединным перпендикуляром к ребру, не имеющему соседнего треугольника;
- далее находим координаты точек пересечения этой прямой со сторонами области (см. рис. 8) и выбираем ту точку ( $P_1$ ), которая расположена по другую сторону от вершины треугольника (вершина с номером 2), не принадлежащей ребру;

- заносим информацию о соседстве для нового узла;
- дополняем информацию о соседних узлах для текущего узла.

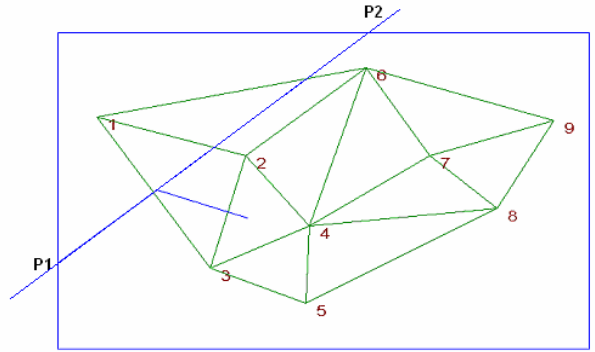


Рис. 8. Пересечение прямой со сторонами области

Процедуру отсечения ребра ячейки границей области так же выполняем, если сосед для треугольника существует, но центр описанной вокруг него окружности расположен вне области.

Далее в цикле по всем граничным узлам происходит дополнение информации о соседних узлах:

- сначала анализируется, какой из сторон области принадлежит текущий граничный узел;
- выполняется поиск ближайших узлов с обеих сторон по отношению к текущему, номера которых дополняют списки соседних узлов.

После того как списки соседства для всех узлов сформированы, выполняется уплотнение нумерации узлов, если некоторые из них не попали в область.

### 3. Алгоритмы формирования координат набора точек

В алгоритмах построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне реализовано несколько методов формирования координат набора точек. Ниже представлены примеры формирования координат точек для прямоугольных областей, так как в методике ТИМ-2D один из способов построения сетки это обрамление любой геометрии прямоугольником, построение сетки в этом прямоугольнике, а затем из точного покрытия, путем разрезания ячеек вдоль границы, строится вписанная в границу подобласти сетка.

Первый – это возможность загружать координаты точек из файла. Благодаря этому в программу построения сетки Дирихле могут быть загружены координаты, сформированные отдельной подпрограммой генерации точек, либо введенные вручную пользователем. Пример такой сетки показан на рис. 10, где сначала выполнено построение триангуляции Делоне по заданному набору точек (см. рис. 10а), а на ее основе выполнено построение сетки Дирихле (см. рис. 10б).

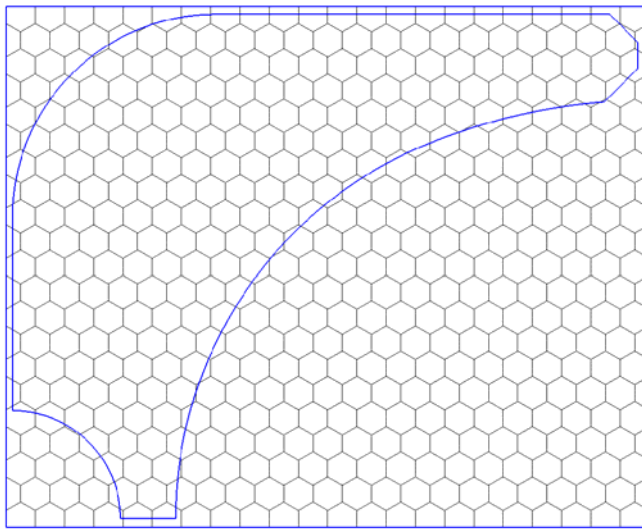


Рис. 9. Один из способов построения сетки в методике ТИМ-2D

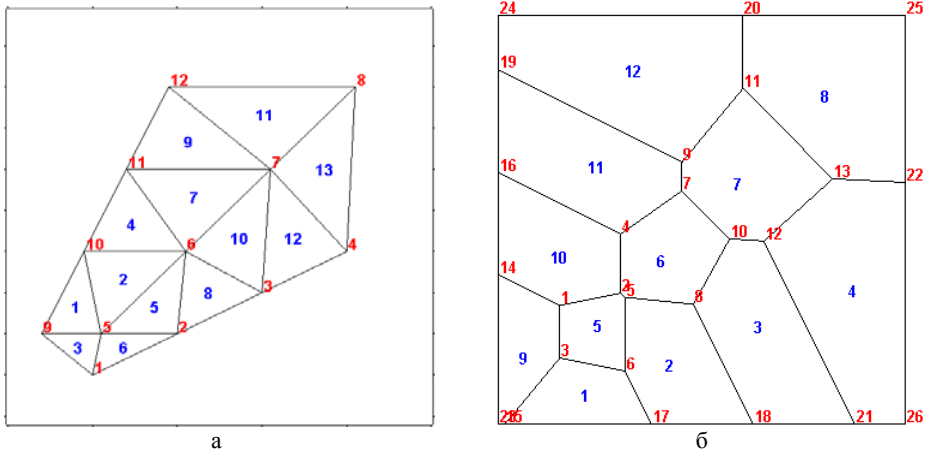


Рис. 10. Пример триангуляции Делоне (а), выполненной по заданному из файла набору точек и построенной на ее основе сетки Дирихле (б)

Введем следующие обозначения, которые далее будут применяться:

$X_{\max}, Y_{\max}, X_{\min}, Y_{\min}$  – максимальные и минимальные координаты границы области;

$D_X$  – расстояние между центрами соседних ячеек по оси  $X$ ;

$D_Y$  – расстояние между центрами соседних ячеек по оси  $Y$ ;

$K_X, K_Y$  – число ячеек вдоль оси абсцисс и оси ординат;

$K_C$  – количество точек участвующих в построении триангуляции Делоне;

$X_C, Y_C$  – координаты этих точек.

Второй способ – это построение сетки с расстановкой точек случайным образом (см. рис. 11). Здесь с помощью функции *SetRange* значение координат точки из диапазона случайных чисел от 0 до 1, преобразовывается к диапазону возможных значений, в зависимости от размеров области. Это преобразование выполняется по следующим формулам:

$$X_C = X_{\min} + X_C (X_{\max} - X_{\min}),$$

$$Y_C = Y_{\min} + Y_C (Y_{\max} - Y_{\min}).$$

Третий способ – расстановка точек в шахматном порядке, таким образом, в результате чего получается сетка из шестиугольников. На рис. 12(б) показан пример построения такой сетки.

Координаты центров ячеек вычисляются следующим образом:

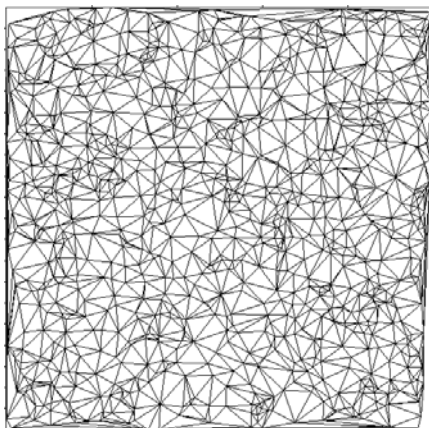
$$D_X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K_X - 1}, \quad D_Y = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K_Y - 1};$$

$$X_C = X_{\min} + \frac{D_X}{2} K + (i-1)D_X,$$

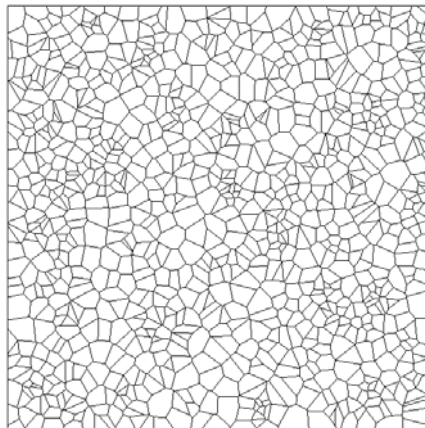
$i = 1, \dots, K_X$ ,  $K = 1$ , если  $i$  – нечетное число и  $K = 0$ , если  $i$  – четное.

$$Y_C = Y_{\min} + (j-1)D_Y,$$

где  $j = 1, \dots, K_Y$

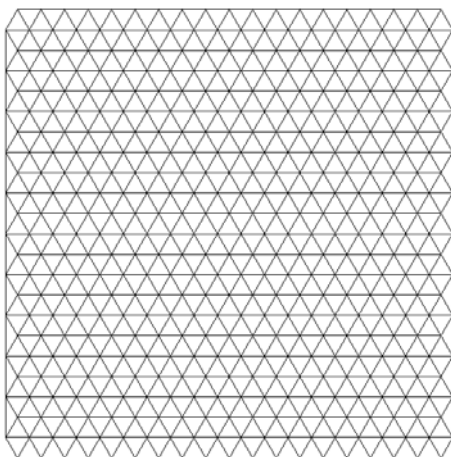


а

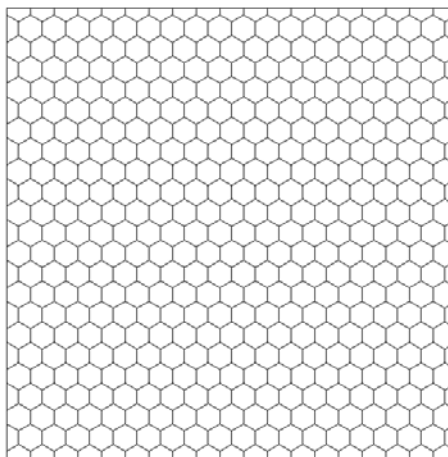


б

Рис. 11. Пример триангуляции Делоне (а), выполненной по набору точек, сгенерированных случайным образом, и построение на ее основе сетки Дирихле(б)



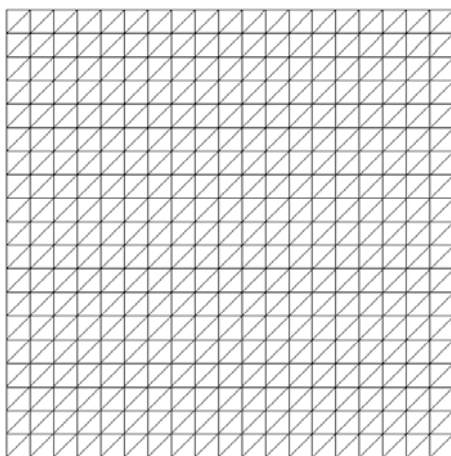
а



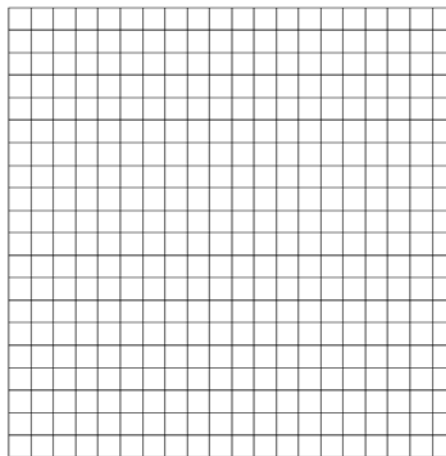
б

Рис. 12. Пример триангуляции Делоне, выполненной по набору точек (а), заданных в шахматном порядке, и построение на ее основе сетки Дирихле из шестиугольников (б)

Четвертый способ – равномерное покрытие области точками с определенным шагом по  $X$  и по  $Y$ . В результате получается четырехугольная сетка (см. рис. 13(б)).



а



б

Рис. 13. Пример триангуляции Делоне (а), выполненной по набору точек, равномерно распределенных по области, и построение на ее основе четырехугольной сетки Дирихле (б)



Координаты центров ячеек вычисляются следующим образом:

$$D_X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K_X}, \quad D_Y = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{K_Y},$$

$$X_C = X_{\min} + iD_X - \frac{D_X}{2}, \quad Y_C = Y_{\min} + jD_Y - \frac{D_Y}{2},$$

где  $i = 1, \dots, K_X, j = 1, \dots, K_Y$ .

#### 4. Оценка производительности

Ниже представлены результаты теста на оценку производительности стандартного алгоритма построения сетки Дирихле [6] и алгоритма построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне. Сравнительный график бысродействия вышеупомянутых алгоритмов представлен на рис. 14.

В качестве алгоритма расстановки центров ячеек для данного теста был выбран алгоритм расстановки центров для получения правильных шестиугольных ячеек (см. рис. 11).

Из графика видно, что производительность алгоритма построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне много ниже производительности

стандартного алгоритма. Так построение двумерной нерегулярной сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне на 1000000 ячеек на персональном компьютере с частотой процессора порядка 2,4 ГГц и оперативной памятью 4 Гб заняло около 580 минут, это очень дорого для расчета начальных данных. В связи с этим возникла необходимость оптимизировать данный алгоритм.

Самой дорогой процедурой в данном алгоритме является поиск сопряженной точки для текущего ребра или ближайшего соседа Делоне для текущего треугольника. Ее трудоемкость составляет  $O(N^2)$ . Для ускорения данной процедуры было предложено использовать клеточный алгоритм [5] поиска сопряженной точки.

Сравнение производительности построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне с использованием клеточного алгоритма поиска сопряженной точки для ребра со стандартным алгоритмом построения сетки Дирихле показано на рис. 15.

Из графика видно, что трудоемкость клеточного алгоритма является практически линейной  $O(N)$  и расчет сетки на 1000000 ячеек занимает всего 3 минуты, в то время как стандартный алгоритм построения сетки Дирихле справляется с этой операцией за 100 минут.

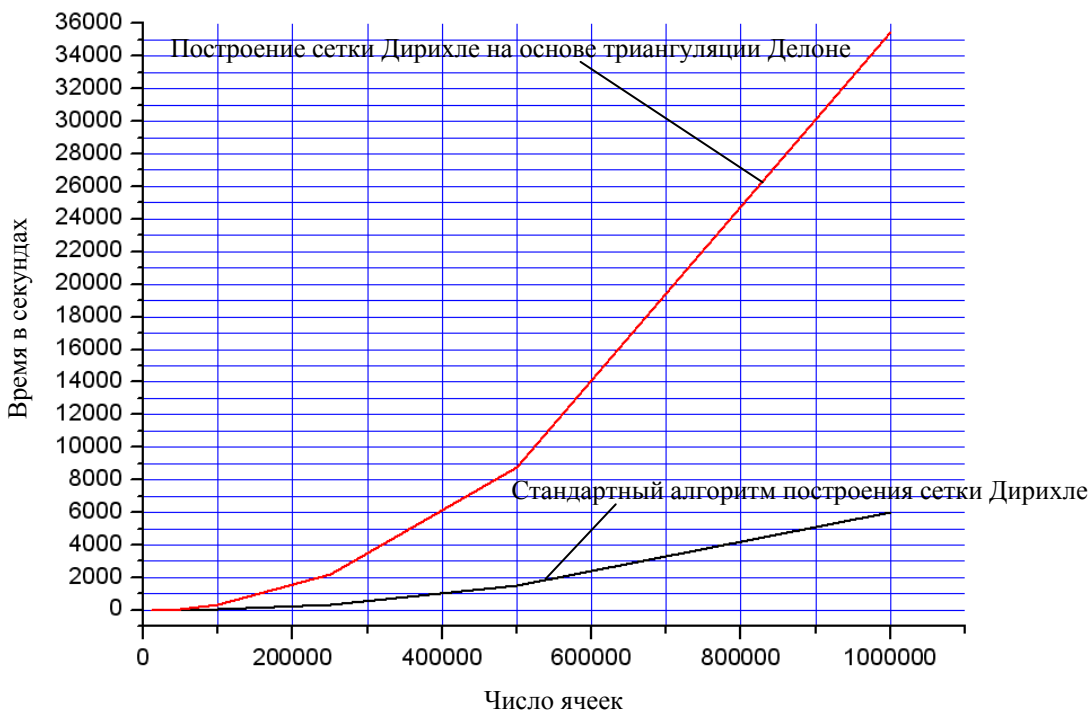


Рис. 14. Сравнение производительности

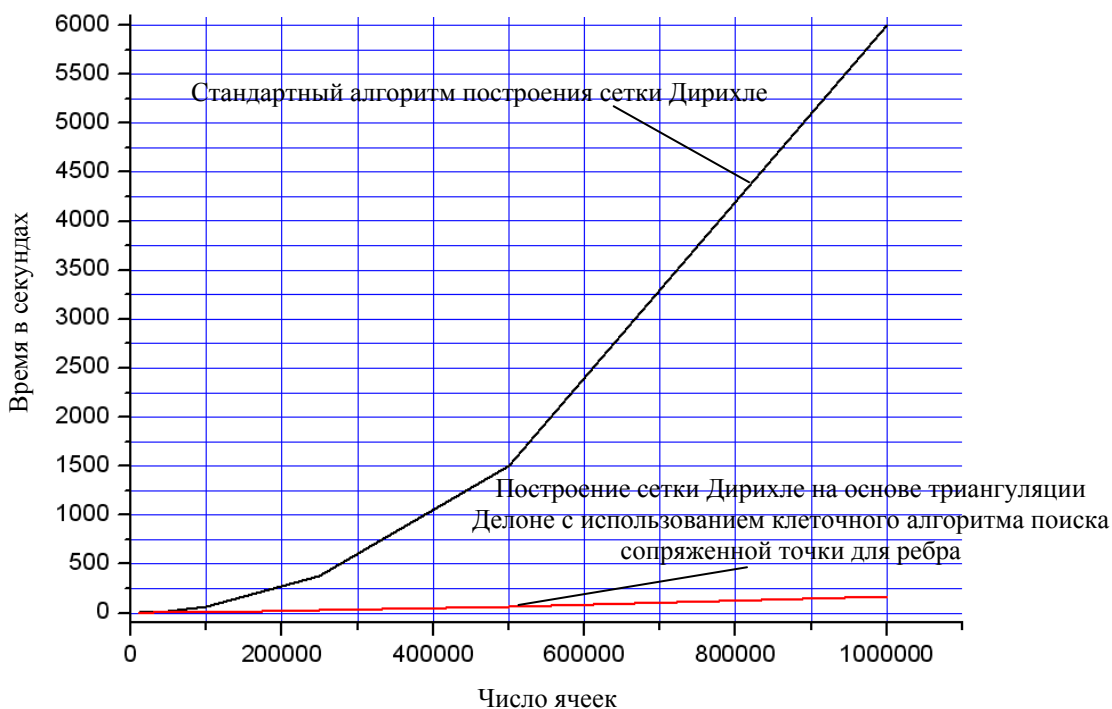


Рис. 15. Сравнение производительности

## Заключение

В результате проделанной работы в программу расчета начальной методики ТИМ-2D внедрен метод построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне. Проведена сравнительная оценка быстродействия стандартного метода построения сетки Дирихле и метода построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне. В рамках данного метода был реализован клеточный алгоритм поиска ближайшего соседа Делоне для текущего треугольника. В результате процедура поиска стала работать быстрее в 190 раз. Благодаря этому общее ускорение метода построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне составило более 30 раз по сравнению со стандартным методом построения сетки Дирихле.

Реализованные алгоритмы построения сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне планируется использовать при построении начальной сетки, а так же в качестве одного из инструментов для локальных перестроек сетки в процессе счета.

## Литература

1. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29–43.
2. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Издательство Томского университета, 2002.
3. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. Пер. с англ. М.: «Издательство БИНОМ», 1997.
4. Скворцов А. В., Костюк Ю. Л. Применение триангуляции для решения задач вычислительной геометрии // Геоинформатика: Теория и практика. Вып. 1. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1998. С. 127–138.
5. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение / Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
6. Соловьев А. В., Соловьева Е. В., Тишкин В. Ф., и др. Об одном алгоритме построения ячеек Дирихле. М., 1985.

# СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О СЧЕТЕ ЗАДАЧ И РАБОТЕ НЕОДНОРОДНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СТАТ-НВК»

Г. Г. Близнюк, С. С. Будникова, И. А. Логинов, Д. Г. Пажин, С. Е. Семенова, Н. А. Шутова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Резкое увеличение в последние годы в РФЯЦ-ВНИИЭФ парка вычислительных систем разнородного класса потребовало создания новой версии системы сбора и обработки информации о счете задач и работе ЭВМ неоднородного вычислительного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## Структура управления счетом задач

В настоящее время создается единая система управления счетом задач на ЭВМ неоднородного вычислительного комплекса (НВК) от задания начальных постановок (СУНПЗ) [1] и управления счетом задач (ЕСУЗ) [2] до хранения результатов расчетов (АДПЗ, АХР) и анализа статистической информации о счете задач и работе ЭВМ НВК.

Одной из частей единой системы управления счетом задач является система СТАТ-НВК сбора и обработки информации о счете задач и работе ЭВМ неоднородного вычислительного комплекса.



Рис. 1. Структура управления счетом задач

Целью разработки СТАТ-НВК являются:

- Сбор и обработка информации о проведении расчетов на ЭВМ НВК ИТМФ с целью проведения анализа качества работы прикладного ПО ИТМФ.
- Автоматизация сбора информации о работе ЭВМ НВК с целью проведения анализа степени влияния сбоя и отказов компонент ЭВМ на производственный счет и определения коэффициентов эксплуатационной надежности работы ЭВМ.

СТАТ-НВК представляет собой комплекс программных средств, функционирующих на ЭВМ НВК и Web-сервере. Основу программных средств системы составляет ОС Linux с установленным программным обеспечением SQL сервера MySQL, HTTP сервера Apache, препроцессора HTML документов PHP. Связь серверов с ПК пользователей осуществляется по протоколу HTTP через локальную вычислительную сеть.

## Схема функционирования системы СТАТ-НВК

Схема функционирования системы показана на рис. 2.

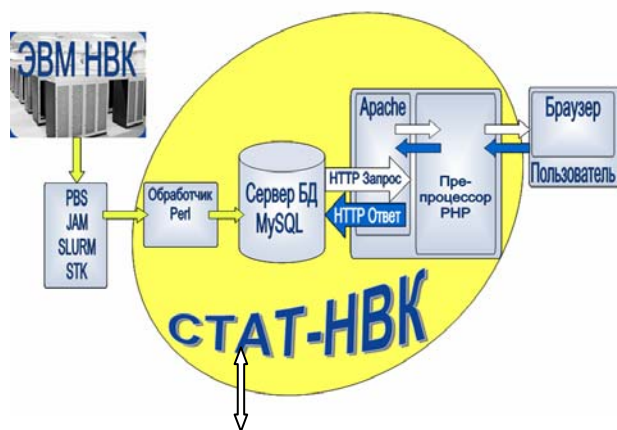


Рис. 2. Схема функционирования СТАТ-НВК

Сбор информации о счете задач осуществляется путем автоматической обработки файлов, вырабатываемых:

- системами управления заданиями (PBS, JAM, SLURM) [3];
- системой сбора информации об использовании вычислительных ресурсов НВК параллельными приложениями STK [4];
- системой мониторинга оборудования.

## Параметры системы СТАТ-НВК

В базе данных СТАТ-НВК учитываются общие параметры расчетов и параметры по процессорам.



Рис. 3. Параметры системы СТАТ-НВК

К общим параметрам относится паспорт задачи и параметры счета задачи. При запуске задачи на счет пользователь заполняет паспорт задачи, который включает в себя: тип ЭВМ, отдел, методику, исполнителя, заказчик, плановую тему, номер задачи, класс расчета.

Параметры счета задачи по каждому заходу включают в себя следующие данные: начало счета, окончание счета, постановку в очередь, время ЦП, оперативную память, виртуальную память, WallTime, количество процессоров, код завершения.

К параметрам системы STK относятся время ЦП в разбивке по каждому процессору на полезное счетное время CPU\_Time, время выполнения MPI-операций, время выполнения операций ввода/вывода, размер сообщений синхронной передачи и другие. По этим данным можно получить средний размер передаваемых сообщений, среднюю скорость передачи по задаче (Мб/с), коэффициент полезного счета – на выполнение арифметических операций, коэффициент накладных расходов – время на MPI-операции и операции ввода/вывода.

## Разграничение прав доступа пользователей в СТАТ-НВК

В системе СТАТ-НВК предусмотрено разграничение прав доступа к информационным ресурсам системы. Пользователем системы СТАТ-НВК может быть сотрудник, зарегистрированный в домене ЛВС и системе СТАТ-НВК. Для работы необходимо войти в домен ЛВС со своей учетной записью и запустить Веб-приложение.

Пользователи системы СТАТ-НВК могут иметь следующие уровни доступа:

- администраторы системы СТАТ-НВК;
- пользователи системы СТАТ-НВК;
- аналитики;
- руководители подразделений (отделов);
- начальники групп дежурных операторов.

Пользователи системы, имеющие уровень доступа «Администратор», имеют право просматривать информацию по счету всех задач и сбоях ЭВМ НВК, а также осуществлять редактирование справочных данных.

Сотрудникам, имеющим уровень доступа «Пользователь», доступна информация по счету тех задач, заказчиками или исполнителями счета которых они являются.

Руководителям отделов доступна информация по счету тех задач, заказчиками или исполнителями счета которых являются сотрудники их отделов.

Аналитикам доступна вся информация о счете всех задач и сбоях ЭВМ НВК.

Начальникам групп дежурных операторов доступна вся информация о сбоях ЭВМ НВК. Они отвечают также за ввод и редактирование информации о состоянии ЭВМ НВК.






 <b>Администратор</b>	<b>Просмотр всей информации о счете задач и сбоях. Редактирование справочных данных, правильных и подозрительных заходов и информации о сбоях.</b>
 <b>Аналитик</b>	<b>Просмотр всей информации о счете задач и сбоях.</b>
 <b>Руководитель</b>	<b>Просмотр информации о счете задач сотрудников отдела.</b>
 <b>Дежурный оператор</b>	<b>Просмотр и редактирование информации о сбоях.</b>
 <b>Пользователь</b>	<b>Просмотр информации о счете задач конкретного пользователя.</b>

Рис. 4. Разграничение прав доступа в системе СТАТ-НВК

## Главная страница системы СТАТ-НВК

Главная страница СТАТ-НВК для пользователя-Администратора представлена на рис. 5.

Пункт меню **Статистика** служит для просмотра информации о счете задач.

Пункт меню **Интегральная статистика** служит для получения аналитической интегральной статистики.

Пункт меню **Сбои** служит для перехода к подсистеме СТАТ-НВК(сбои).

Пункт меню **Коэффициенты загрузки** позволяет проводить анализ работоспособности ЭВМ НВК.

Пункт меню **Справочники** содержит справочники СТАТ-НВК. Система позволяет настраивать справочники в соответствии с требованиями пользователей.

Пункт меню **Редакторы заходов** обеспечивает просмотр и редактирование данных о заходах. При каждом запуске задачи на ЭВМ НВК пользователь

формирует паспорт. Если хотя бы один параметр паспорта задачи не соответствует данным справочников, то этот заход помечается системой как неправильный и не может быть учтен до исправления администратором системы.

Пункт меню **Статус БД** служит для просмотра текущего состояния, переменных конфигурации БД и сервера.

При необходимости, можно сохранить всю полученную информацию о счете задач и состоянии ЭВМ НВК в формате MS Excel или MS Word.

## Просмотр и поиск информации о счете задач

В системе реализован просмотр и поиск информации о задачах счета по определенному набору параметров за необходимый период времени. Пример просмотра и поиска такой информации представлен на рис. 6.

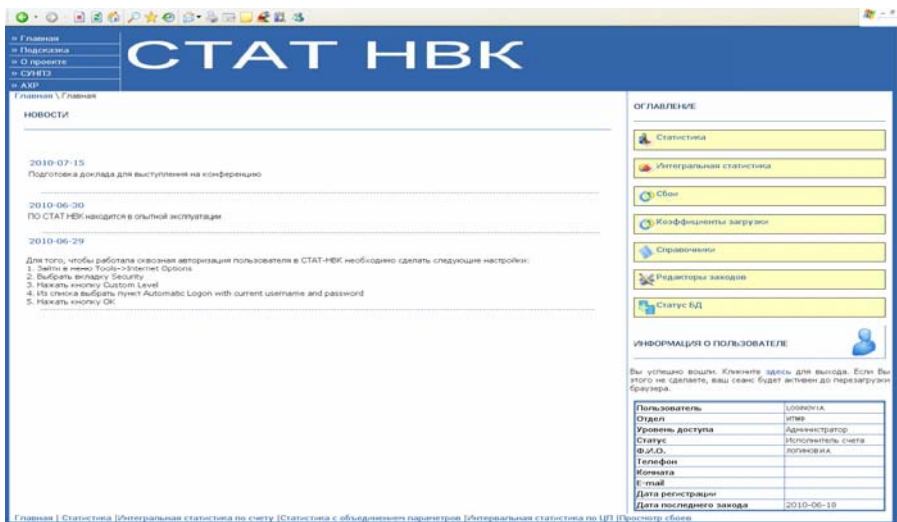


Рис. 5. Главная страница СТАТ-НВК

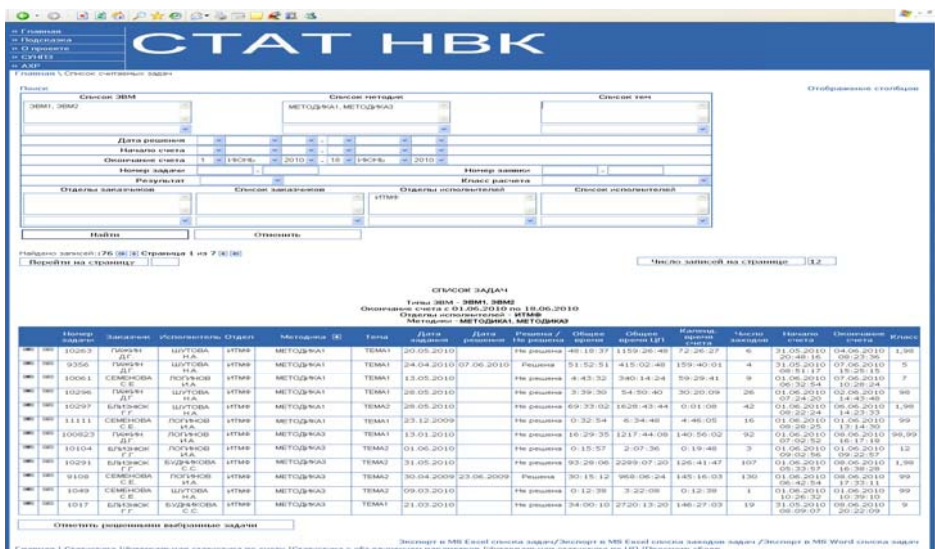


Рис. 6. Просмотр информации о счете задач



Поиск информации осуществляется по всем представленным параметрам (диапазону дат, типам ЭВМ, методикам, темам и т. д.). «Пользователь» видит информацию о счете своих задач, «Руководитель» – о счете своих сотрудников. А «Аналитику» и «Администратору» доступна информация обо всех задачах.

Выбранные в таблице задачи можно отметить «Решенными». При этом для всех выбранных задач будет установлен признак решения задачи и дата решения равная текущей дате.

Реализован просмотр информации о заходах выбранной задачи. Пример просмотра и поиска такой информации представлен на рис. 7.

На странице предоставлена информация о паспорте задачи, количестве заходов и итоговые данные по всем заходам выбранной задачи.

### Просмотр информации о счете задач с группировкой данных по различным параметрам

Реализована возможность создания отчетов по группировке данных по определенным критериям. Пример такой информации о счете задач представлен на рис. 8.

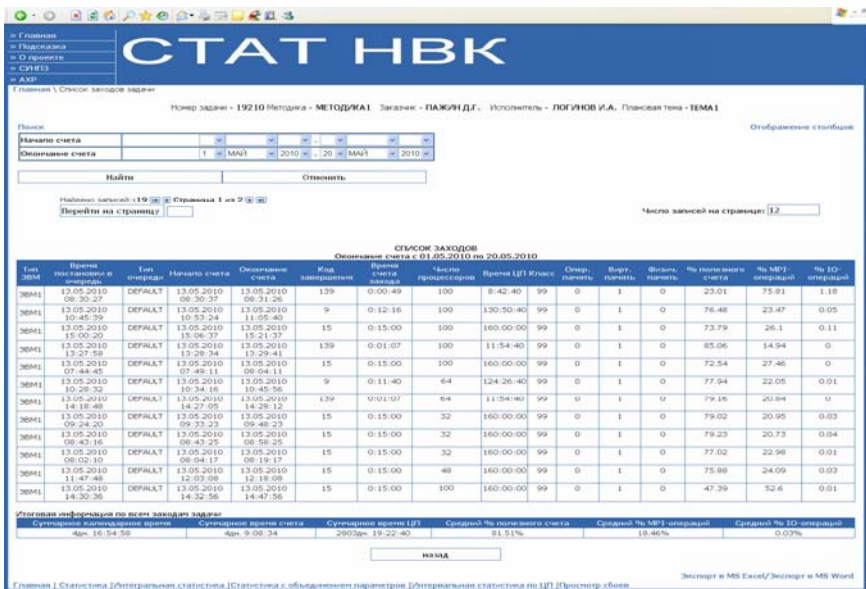


Рис. 7. Просмотр информации о заходах выбранной задачи

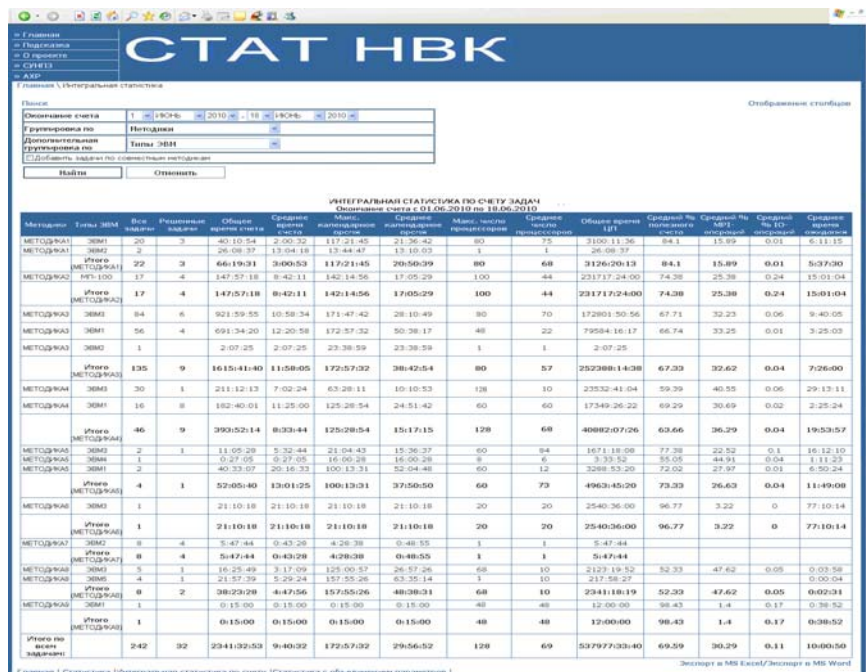


Рис. 8. Просмотр информации о счете задач с группировкой данных по различным параметрам

Информация о счете задач включает следующие данные:

- общее число задач и число решенных задач;
- общее и среднее время счета задачи;
- максимальное и среднее календарное время счета задачи;
- максимальное и среднее число используемых процессоров;
- общее время ЦП;
- средний процент полезного счета, MPI-операций и операций ввода/вывода;
- среднее время ожидания в очереди;
- доля заходов с низким % полезного счета;
- % времени ЦП для заходов с низкой эффективностью.

При создании отчетов возможна группировка данных по методикам, по исполнителям и заказчикам, ЭВМ, темам и классам расчетов.

«Руководителям» доступна статистика о счете задач их сотрудников, включая совместные методики, а «Аналитикам» – статистика по всем задачам.

### Просмотр информации с объединением данных по различным параметрам

Для получения данных с различных машин, в системе реализовано получение статистики с объедине-

нием данных по ЭВМ в разрезе производственного и методического счета

Пример отчета представлен на рис. 9.

Отчет с объединением параметров предоставляет следующие данные о счете задач:

- общее время счета и время ЦП;
- число задач и их заходов;
- среднее время расчета захода и ожидания задачи в очереди;
- среднее и максимальное число использованных процессоров;
- % полезного счета и накладных.

«Руководителям» доступна интегральная отчеты о счете задач их сотрудников, включая совместные методики, а «Аналитикам» – отчеты по всем задачам.

### Просмотр распределения задач по числу использованных процессоров

Для проведения анализа задач по числу использования процессоров в системе реализована возможность получения такого отчета.

Полученный отчет обеспечивает просмотр распределения задач по числу использованных процессоров на каждой выбранной ЭВМ. Пример отчета представлен на рис. 10.

СТАТИСТИКА С ОБЪЕДИНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ											
Описание счета с 01.06.2010 по 18.06.2010											
ЭВМ1											
Методика	Время ЦП	% ЦП	Время счета	Заходов	Задач	Среднее время расчета захода	Среднее время ожидания задачи	Процессоров (Среднее)	Процессоров на заход (Сред.)	% полезного счета	% накладных
МЕТОДЖА1	230692:23:52	49.32	145:56:57	96	13	1:31:13	108:42:21	67	76	74.51	26.49
МЕТОДЖА2	159329:35:44	34.06	832:10:46	485	59	1:42:57	56:12:26	20	20	71.77	29.23
МЕТОДЖА3	14164:26:32	3.03	150:54:32	150	19	1:00:21	51:54:07	37	72	63.92	36.08
МЕТОДЖА4	27718:21:28	5.93	71:23:14	15	3	4:45:32	51:04:57	32	72	54.78	48.22
<b>Итого по произв. счету:</b>	<b>431904:47:36</b>	<b>92.34</b>	<b>1200:25:19</b>	<b>746</b>	<b>94</b>	<b>1:36:32</b>	<b>69:26:02</b>	<b>40</b>	<b>76</b>	<b>71.61</b>	<b>28.39</b>
ЭВМ3											
МЕТОДЖА1	1025:00:08	0.22	2:00:21	11	4	0:30:25	0:36:02	19	100	49.33	51.47
МЕТОДЖА2	20108:00:08	4.3	107:43:42	446	23	0:14:29	32:15:19	81	80	53.41	46.59
МЕТОДЖА3	9368:14:32	2	60:17:41	22	11	2:44:26	82:28:06	24	52	50.52	49.48
МЕТОДЖА5	5:26:08	0	0:40:46	2	1	0:20:23	0:00:00	16	48		
МЕТОДЖА4	3190:51:04	0.68	27:05:42	36	11	0:45:09	14:12:43	27	44	76.31	23.69
МЕТОДЖА6	2123:19:52	0.45	16:25:49	34	5	0:28:59	0:40:46	75	68	52.33	47.67
<b>Итого по метод. счету:</b>	<b>35820:51:52</b>	<b>7.66</b>	<b>214:14:01</b>	<b>554</b>	<b>55</b>	<b>0:23:12</b>	<b>32:55:48</b>	<b>62</b>	<b>100</b>	<b>54.02</b>	<b>45.98</b>
<b>Итого по ЭВМ1</b>	<b>467725:39:28</b>	<b>100</b>	<b>1414:39:30</b>	<b>1300</b>	<b>149</b>	<b>1:05:17</b>	<b>51:32:36</b>	<b>39</b>	<b>100</b>	<b>68.77</b>	<b>31.23</b>
ЭВМ3											
МЕТОДЖА6	2787:05:29	0.48	35:28:53	70	15	0:27:15	11:03:14	12	80		
МЕТОДЖА2	63361:28:35	11	563:45:51	205	32	2:45:00	18:08:52	24	48	69.19	30.81
МЕТОДЖА3	14588:01:02	2.89	170:46:11	131	14	1:19:12	19:34:07	79	100	68.72	31.28
МЕТОДЖА5	4954:45:20	0.86	50:57:49	16	2	3:11:06	108:27:46	96	100	73.83	26.17
МЕТОДЖА4	123267:51:04	21.39	341:41:44	31	6	11:01:29	29:02:16	20	20	48.84	51.16
МЕТОДЖА8	349627:35:57	60.67	2024:29:54	155	36	13:03:40	13:41:13	32	32	60.72	39.28
<b>Итого по произв. счету:</b>	<b>560606:34:26</b>	<b>97.28</b>	<b>3187:07:22</b>	<b>616</b>	<b>105</b>	<b>5:10:26</b>	<b>18:00:13</b>	<b>51</b>	<b>100</b>	<b>59.82</b>	<b>40.18</b>
МЕТОДИЧЕСКИЙ СЧЕТ											
МЕТОДЖА6	313:06:08	0.05	4:45:01	13	5	0:21:55	22:30:50	60	128	84.1	15.9
МЕТОДЖА2	9649:54:46	1.67	126:55:22	420	23	0:18:07	18:46:49	64	128	59.6	40.4
МЕТОДЖА3	761:29:20	0.13	11:53:50	4	2	2:58:27	0:26:48	29	64	81.73	18.27
МЕТОДЖА4	9:06:28	0	0:11:32	8	1	0:01:26	0:10:21	32	80	93.12	6.88
МЕТОДЖА8	4783:13:52	0.83	17:40:46	50	6	0:21:12	21:09:04	72	72	89.71	10.29
МЕТОДЖА7	143:58:43	0.22	5:09:20	65	4	0:04:45	9:01:53	43	64	91.85	8.15
<b>Итого по метод. счету:</b>	<b>15660:45:17</b>	<b>2.72</b>	<b>166:35:51</b>	<b>560</b>	<b>41</b>	<b>0:17:50</b>	<b>16:09:46</b>	<b>63</b>	<b>128</b>	<b>70.44</b>	<b>29.56</b>
<b>Итого по ЭВМ2</b>	<b>576267:19:43</b>	<b>100</b>	<b>33521:43:13</b>	<b>1176</b>	<b>146</b>	<b>2:51:06</b>	<b>17:29:12</b>	<b>60</b>	<b>128</b>	<b>60.11</b>	<b>39.89</b>
<b>Итого по всем ЭВМ:</b>	<b>1043992:59:11</b>	<b>100</b>	<b>4768:22:43</b>	<b>2476</b>	<b>295</b>	<b>1:05:33</b>	<b>34:41:17</b>	<b>51</b>	<b>128</b>	<b>63.34</b>	<b>36.66</b>

Рис. 9. Отчет с объединением данных по ЭВМ в разрезе производственного и методического счета



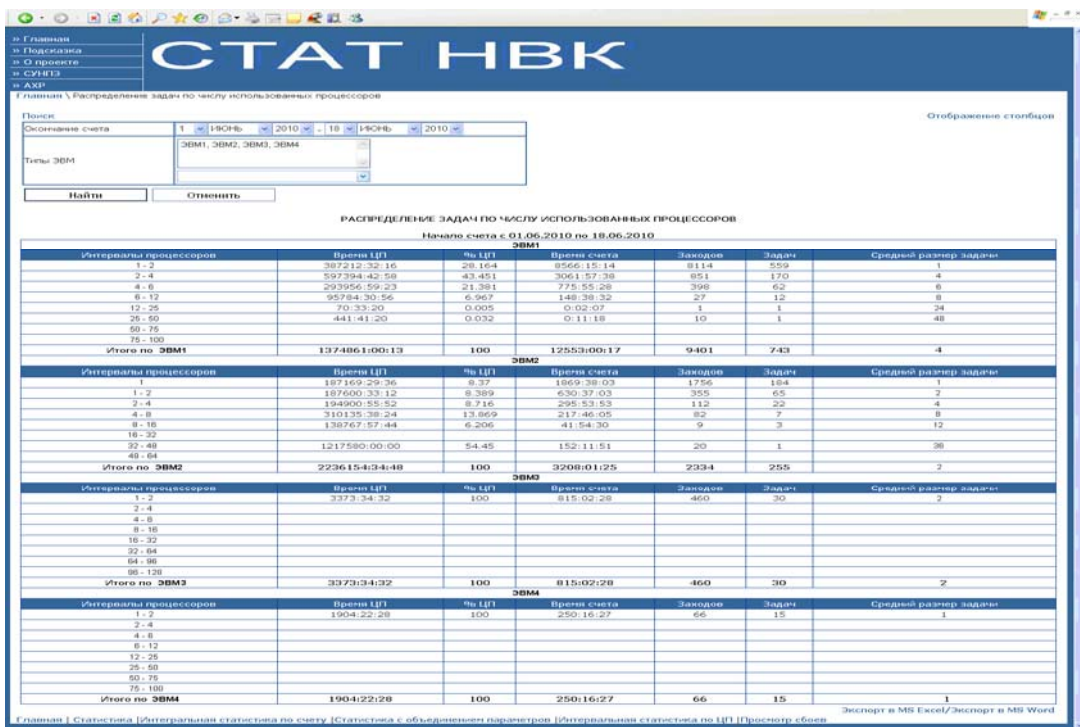


Рис. 10. Просмотр распределения задач по числу использованных процессоров

На данной странице доступен просмотр следующей информации:

- интервалы процессоров;
- суммарное время ЦП;
- доля использования времени ЦП к общему времени ЦП;
- общее время счета задач;
- число заходов и число задач;
- средний размер задачи.

### Сбор и обработка информации о сбоях компонент ЭВМ НВК

Для оценки эксплуатационной надежности машин, оценки влияния сбоев на счет задач введена возможность сбора информации о работе неоднородного вычислительного комплекса при помощи подсистемы СТАТ-НВК (сбои), которая обеспечивает:

- централизованный сбор информации о сбоях, ремонтах и профилактиках в работе ЭВМ НВК;
- подготовку отчетов о состоянии ЭВМ НВК за выбранный интервал времени;
- анализ состояния ЭВМ и расчет коэффициентов работоспособности, загрузки и эксплуатационной надежности;
- ведение справочников, необходимых для функционирования СТАТ-НВК (сбои).

Объектами сбоя могут быть: ЭВМ, системы жизнеобеспечения, операционная система, файловые и инструментальные сервера, узлы и т. д.

В качестве параметров сбоев указывается: дата начала и окончания события (сбоя, профилактики,

ремонта), объект сбоя, причины сбоя, ФИО ответственного за устранение сбоя, № дежурной смены операторов, зафиксировавшей сбоя.

На рис. 11 представлен пример просмотра таблицы, содержащей информацию о сбоях, доступной пользователям системы. На основе собранных данных о состоянии ЭВМ НВК формируются документы: журнал оператора и расчет потерь непроизводительного времени.

Предусмотрено разграничение прав доступа пользователей в СТАТ-НВК(сбои):

- «Администратор»;
- «Аналитик»;
- «Начальник группы дежурных операторов».

Пользователям с правами «Администратора» и «Начальника группы дежурных операторов» доступны все формы подсистемы СТАТ-НВК (сбои), включая добавление нового сбоя и ведение справочников. Пользователям с правами «Аналитика» доступен просмотр информации о сбоях, создание отчетов и просмотр справочников.

Функция создания «Журнала оператора» создавалась для начальников групп дежурных операторов. Функция предназначена для подготовки отчетов о состоянии ЭВМ НВК за выбранный интервал времени.

При формировании документа из БД считываются все записи о сбоях за указанный период (см. рис. 12). Данные группируются по ЭВМ НВК и типам сбоев. Подсчитывается количество сбоев определенного типа и время потерь (в часах) по каждому типу сбоя для каждой ЭВМ в отдельности за выбранный интервал времени.

№	СБОИ	Дата начала сбоя	Дата окончания сбоя	Родитель сбоя	Объект сбоя	Имя объекта сбоя	Сбой	Комментарии	Системный программист	Номер док. смены
1	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел10	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
2	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел11	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
3	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел12	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
4	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел13	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
5	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел14	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
6	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел15	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ЛОГИНОВ И.А.	1
7	СБОИ	04.05.2010 17:20:00	04.05.2010 18:30:00	ЭВМ1	Узел	Узел16	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	1
8	СБОИ	07.05.2010 02:00:00	07.05.2010 09:35:00	ЭВМ1	Узел	Узел421	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	2
9	СБОИ	05.05.2010 11:00:00	05.05.2010 13:35:00	ЭВМ2	Узел	Узел422	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	1
10	СБОИ	05.05.2010 13:35:00	05.05.2010 16:50:00	ЭВМ2	Узел	Узел423	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	1
11	СБОИ	05.05.2010 19:30:00	07.05.2010 16:00:00	ЭВМ2	Узел	Узел424	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	4
12	СБОИ	06.05.2010 05:03:00	07.05.2010 09:00:00	ЭВМ3	Узел	Узел51	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	4
13	СБОИ	07.05.2010 12:00:00	11.05.2010 09:00:00	ЭВМ3	Узел	Узел52	Отказ/сбой узла (SOFT/ЛЮ)	-	ПАЖИЧ Д.Г.	1

Рис. 11. Просмотр информации о сбоях

ЭВМ	Характер сбоя, работ	Дата/время сбоя	Работали	Время потеря, ч	Закр. узлы на тек. момент
ЭВМ1	ОС		-	0	
	Инстр. сервера		-	0	
	Файл. сервера		-	0	
	ПФС		-	0	
Узлы	Узел1 -Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	07/05 16:00-07/05 17:00	ЛОГИНОВ И.А.	1	
Профилактика			-	0	
СЖО			-	0	
ОС	-Сбой ОС	07/05 10:00-07/05 14:00	ПАЖИЧ Д.Г.	4	
Инстр. сервера			-	0	
Файл. сервера	FS1 -Не доступен файловый сервер	29/04 11:30-29/04 11:40	ПАЖИЧ Д.Г.	0	
ПФС			-	0	
ЭВМ2	Узлы	Узел11-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	30/04 16:00-04/05 09:30		
	Узел12-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел13-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел14-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел15-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел16-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел17-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел18-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел19-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел20-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел21-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел22-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
	Узел23-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30			
Узел24-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30				
Узел25-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30				
Узел26-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30				
Узел27-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	04/05 17:20-04/05 18:30				
Узел28-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	09/05 02:30-12/05 08:00				
Узел29-Отказ/сбой узла(SOFT/ЛЮ)	11/05 16:00-11/05 16:10				
Профилактика			-	0	
СЖО			-	0	

Рис. 12. Фрагмент журнала оператора

Расчет потерь непроизводительного времени позволяет анализировать состояние ЭВМ и рассчитывать коэффициенты работоспособности, загрузки и эксплуатационной надежности. На рис. 13 представлена форма расчета потерь непроизводительного времени для выбранной ЭВМ за указанный период времени. Расчет выполняется на основе собранных данных о сбоях ЭВМ по разработанной ранее методике.

Значение коэффициента  $K$  рассчитывается с учетом отказов различных компонент вычислительных систем и в зависимости от степени влияния каждого типа отказа на работу ЭВМ.

Система «СТАТ-НВК» обеспечивает автоматический расчет коэффициентов, позволяющих анализировать состояние ЭВМ НВК.

При расчете коэффициентов загрузки и работоспособности, учитываются загрузка и простои ЭВМ из-за различных факторов. Данные для расчета (потери непроизводительного времени, время потерь из-за определенных сбоев) берутся из подсистемы СТАТ-НВК (сбои). Расчет коэффициента эксплуатационной надежности, комплексного коэффициента эксплуатационной надежности и коэффициента продуктивности эксплуатации выполняется на основе собранных данных о сбоях ЭВМ по разработанной ранее методике [5].

Интерфейс страницы представлен на рис. 14.

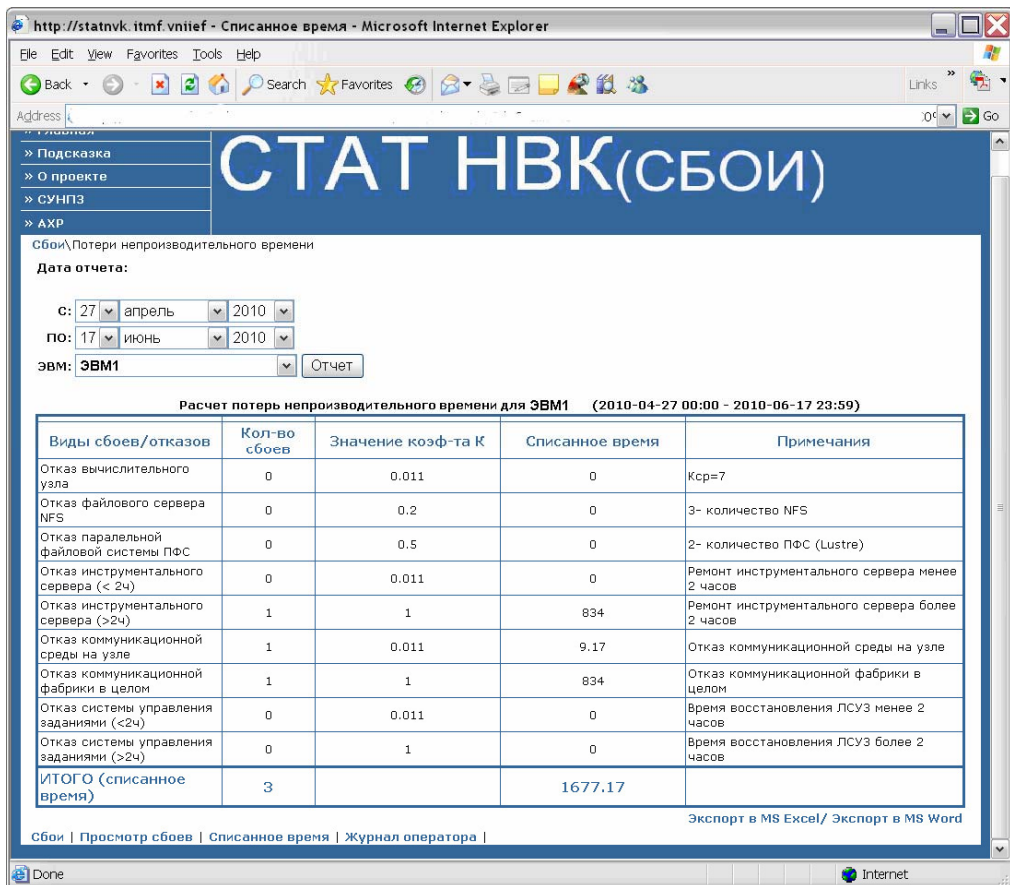


Рис. 13. Расчет потерь непроизводительного времени

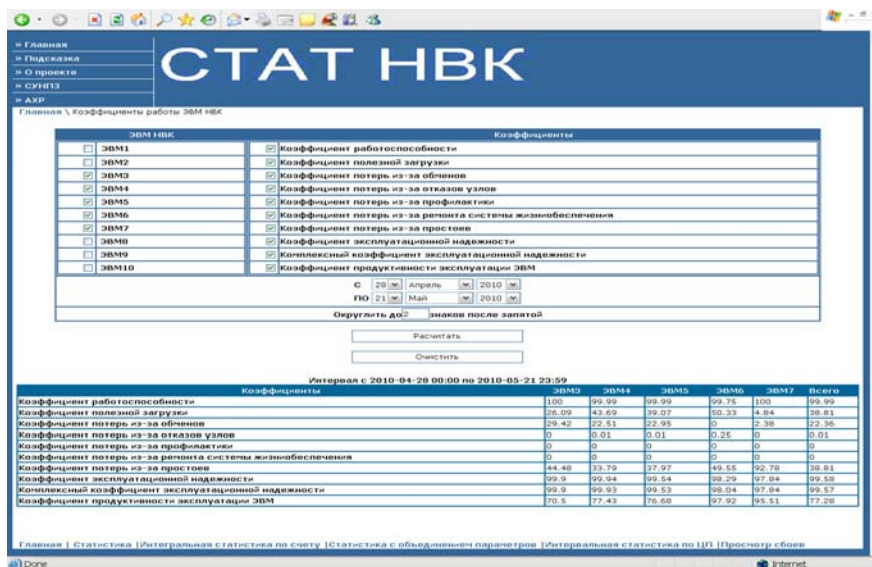


Рис. 14. Расчет коэффициентов

## Закключение

В отличие от предыдущей версии системы «Статистика НВК», разработанной в 2000 году [6], система СТАТ-НВК:

- позволяет существенно ускорить процесс получения информации;
- обеспечивает разграничение прав доступа;

- имеет больше функциональных возможностей по анализу и обработке информации о счете задач;
- автоматизирован сбор информации о работе ЭВМ НВК;
- анализ степени влияния сбоев/отказов компонентов ЭВМ на производственный счет;
- имеет более удобный пользовательский интерфейс.

## Литература

1. Близнюк Г. Г., Пажин Д. Г., Ермошкина К. С., Шутова Н. А. Система управления начальными постановками задач // VIII научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: Анн. к докл. Саров, 10–12 ноября, 2009.

2. Киселев А. Б., Бартенев Ю. Г., Варгин А. М., Киселев С. Н., Колпаков С. И. Единая система управления заданиями на ЭВМ неоднородного вычислительного комплекса // Вопросы атомной науки и техники. 2008. Вып. 1.

3. Киселев А. Б., Бартенев Ю. Г., Варгин А. М., Киселев С. Н., Колпаков С. И., Федоров В. К. Автоматизированная программная система управления мультикластерным вычислительным комплексом // XI международный семинар супервычисления и математическое моделирование: Тез. докл. Саров, 5–9 октября, 2009.

4. Новаев Д. А., Киселев А. Б., Бартенев Ю. Г., Варгин А. М., Киселев С. Н., Колпаков С. И., Кульнев Д. В., Липов Д. И. Инструментальные средства анализа выполнения параллельных приложений // IX Международный семинар супервычисления и математическое моделирование: Тез. докл. Саров, 3–7 октября, 2006.

5. Бартенев Ю. Г., Близнюк Г. Г., Логвин Ю. В., Шатохина Ю. В. Интегральные показатели оценки работы многопроцессорных вычислительных систем // Вопросы атомной науки и техники. 2010. Вып. 4.

6. Близнюк Г. Г., Шутова Н. А. Средства информационной системы «СТАТИСТИКА НВК» для проведения анализа работы ЭВМ НВК // VII научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: Докл. Саров, 28–30 октября, 2008.



# **СЕКЦИЯ 2**

## **Экспериментальная физика**

Председатели секции:

д-р физ.-мат. наук В. С. Гордеев

д-р физ.-мат. наук А. Е. Дубинов

д-р физ.-мат. наук Ф. А. Стариков

канд. физ.-мат. наук Н. В. Невмержицкий

---

---



# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШОЙ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

С. А. Анциферов, В. В. Калиновский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Применение лазеров актуально для различных приложений, в которых необходимо зондировать атмосферу на дальние расстояния. Часто излучение, пройдя сквозь атмосферу, имеет слабую интенсивность и почти незаметно в условиях солнечной засветки. Современные отечественные интерференционные фильтры имеют полосу пропускания 10...30 нм, и их часто не хватает для эффективного ослабления фона. Поэтому для регистрации излучения желательно иметь дополнительное устройство, позволяющее ослаблять фон и пропускать только необходимое нам лазерное излучение. Таким устройством может быть интерферометр Фабри-Перо (ИФП). Целью данной работы была разработка селектора на основе интерферометра Фабри-Перо для выделения лазерного излучения и ослабления фоновой засветки до необходимого уровня.

Интерферометр Фабри-Перо представляет собой две плоские зеркальные пластины с коэффициентом отражения  $r$ . При прохождении пучка света через интерферометр в результате многократных отражений образуется ряд параллельных, интерферирующих между собой, световых пучков [1].

Важнейшими характеристиками интерферометра Фабри-Перо являются: контраст  $C$  (соотношение интенсивностей в максимуме и минимуме в спектральном распределении излучения, прошедшего интерферометр), аппаратная ширина интерферометра  $\delta\lambda$  (ширина контура изображения бесконечно узкой спектральной линии на выходе интерферометра); и область свободной дисперсии  $\Delta\lambda$  (интервал длин волн, для которых коэффициент пропускания интерферометра минимален) [2, 3]. Область свободной дисперсии определяет ширину спектрального диапазона, который может быть исследован в данном порядке интерференции. Если она окажется меньше ширины линии, излучаемой источником, то соседние кольца сливаются, и юстировка интерферометра при этом невозможна [3, 4]. Важной характеристикой является также отношение величины аппаратной ширины ИФП к величине области свободной дисперсии  $w$ . Указанные характеристики ИФП описываются следующими формулами:

$$w = \frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1-r}{\pi\sqrt{r}} \quad (1)$$

$$C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(1+r)^2}{(1-r)^2} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (3)$$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2(1-r)}{2d\pi\sqrt{r}} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $r$  – коэффициент отражения зеркал,  $d$  – расстояние между зеркалами.

Распределение интенсивности излучения в интерференционной картине, образованной в фокальной плоскости, определяется следующим выражением [5]:

$$I = \frac{T^2}{(1-r)^2 + 4r\sin^2\pi m} \quad (5)$$

Здесь  $r$  – коэффициент отражения, а  $T$  – коэффициент пропускания зеркала интерферометра, причем предполагается, что оба зеркала имеют одинаковые  $r$ ,  $T$  и  $e$  ( $e$  – коэффициент поглощения) [1].

На рис. 1 видно, что спектральное распределение света, прошедшего интерферометр, состоит из линий с шириной, равной аппаратной ширине, отстоящих друг от друга на интервал длин волн, равный  $\Delta\lambda$ .

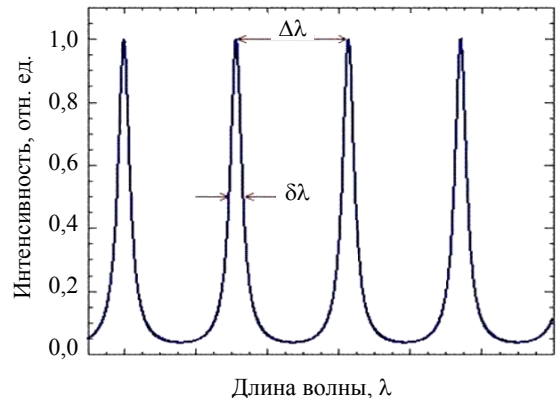


Рис. 1. Спектральное распределение излучения, прошедшего через интерферометр Фабри-Перо

Таким образом, можно выбрать параметры интерферометра так, чтобы излучение лазера соответствовало аппаратной ширине интерферометра и при выполнении условия максимума (то есть когда оптическое расстояние от одного зеркала до другого равно целому числу длин волн) проходило через интерферометр, а остальное излучение отражалось. На этом и основан предлагаемый метод выделения слабого рабочего сигнала и ослабления фоновой засветки.



Было решено проводить исследования с использованием He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм, то есть настроить интерферометр так, чтобы он пропускал излучение данного лазера и ослаблял иное излучение. Для того чтобы определить, какие необходимы настройки интерферометра, были произведены измерения ширины линии излучения лазера. Был сформирован расходящийся пучок, который, пройдя интерферометр, фокусировался линзой на матрицу камеры Spigicon. На матрице формировалась интерференционная картина, представляющая собой концентрические кольца. Измеряя ширину и радиус колец, вычислялась спектральная ширина линии излучения лазера  $\delta\lambda$ . Расчет проводился по следующей формуле [6].

$$\delta\lambda = \lambda \frac{R\Delta R}{F^2}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус интерференционного кольца,  $\Delta R$  – толщина того же кольца,  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Была определена ширина линии излучения He-Ne лазера:  $\delta\lambda = (1,32 \pm 0,23)10^{-2}$  нм.

По формулам (3, 4) были рассчитаны основные характеристики интерферометра Фабри-Перо для имеющих зеркала с коэффициентами отражения 0,98 и 0,71. Ширина линии излучения He-Ne лазера практически совпадала с аппаратурной шириной при коэффициентах отражения зеркал 0,71 и расстоянии между ними 2 мм. Для подтверждения этого, были проведены измерения пропускания интерферометра в зависимости от расстояния между зеркалами.

Параллельный лазерный пучок направлялся на фотоприемник. Измеряя напряжение с него, судили об интенсивности излучения. Затем между источником лазерного излучения и фотоприемником ставился интерферометр, и производилась его юстировка. По изменению напряжения с фотоприемника судили о коэффициенте пропускания ИФП. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений пропускания ИФП излучения He-Ne лазера при различных расстояниях между зеркалами. Коэффициент отражения зеркал 0,71

Расстояние между зеркалами, мм	Пропускание ИФП излучения He-Ne лазера, %
0,3	66
0,6	66
1	65
2	63
3	49

То, что с уменьшением расстояния между зеркалами, начиная с 1 мм, пропускание не увеличивается, говорит о том, что аппаратурная ширина становится больше ширины линии излучения лазера. Теоретически пропускание интерферометра может достигать 100%. Полученный результат объясняется низким качеством зеркал и возможной неточностью настройки интерферометра.

Необходимо учитывать, что регистрируемое лазерное излучение может приходиться на фотоприемное устройство с некоторой угловой неопределенностью. При этом для некоторых углов нарушится условие максимума пропускания ИФП, и появятся потери излучения. Для исследования зависимости пропускания интерферометра от угла падения на него излучения был выполнен следующий эксперимент. При помощи телескопа и диафрагмы был сформирован пучок лазера с расходимостью  $8 \cdot 10^{-5}$  рад. Излучение направлялось на интерферометр и затем фокусировалось в фотоприемник. Сам интерферометр располагался на поворотном столе для изменения угла падения на него излучения. Результаты измерений приведены на рис. 2, 3.

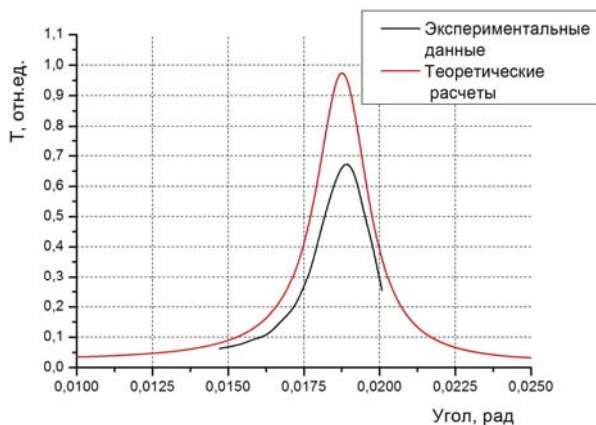


Рис. 2. Теоретическая и экспериментально измеренная зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения ( $r = 0,71$ ;  $d = 1$  мм)

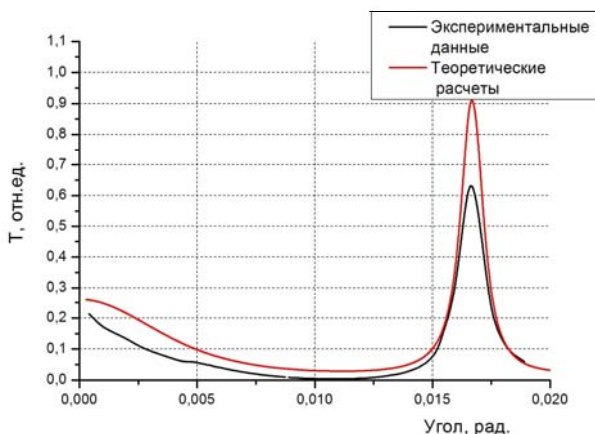


Рис. 3. Теоретическая и экспериментально измеренная зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения ( $r = 0,71$ ;  $d = 2$  мм)

Видно, что полученная в эксперименте зависимость близка к теоретической. Низкое качество зеркал привело к уменьшению максимума пропускания, но не оказало влияния на зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения.

Поскольку регистрируемое излучение может иметь очень низкую интенсивность, в состав фотоприемного устройства обычно входит телескоп, захватывающий

возможно больше излучения, рассеянного в зоне исследования. На рис. 4 показаны варианты использования фотоприемного устройства с интерферометром Фабри-Перо.

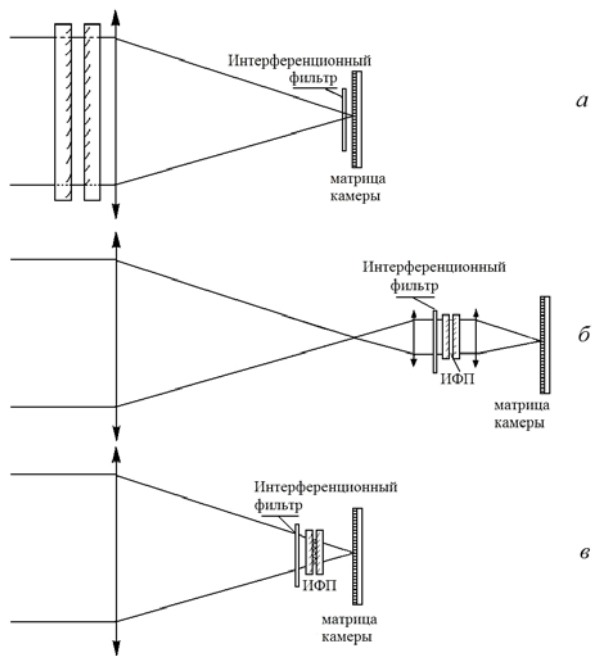


Рис. 4. Схема фотоприемного устройства и возможные варианты его применения с ИФП

Ранее мы показали, что интерферометр имеет высокий коэффициент пропускания для параллельного пучка даже при использовании зеркал условно низкого качества. Однако, использование дополнительных оптических элементов, преобразующих широкий сходящийся пучок в узкий параллельный, как показано на рис. 4 б, усложняет конструкцию фотоприемного устройства. Кроме того, неизбежны потери на каждом оптическом элементе. Наиболее простым вариантом было бы применение интерферометра в схеме, изображенной на рис. 4 в. При этом через него будет проходить сходящийся пучок. Для того, чтобы проверить, как это отразится на коэффициенте пропускания ИФП, были выполнены следующие исследования.

На интерферометр был направлен лазерный пучок с углом схождения пучка 0,1 рад, который затем попадал на фотоприемник, напряжение с которого регистрировалось осциллографом. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений пропускания ИФП излучения He-Ne лазера с углом схождения 0,1 рад при различных расстояниях между зеркалами. Коэффициент отражения зеркал 0,71

Расстояние между зеркалами, мм	Пропускание интерферометра, %
0,3	30,8
0,6	30,8
1	30,8
2	28

Видно, что коэффициент пропускания интерферометра, аппаратурная ширина которого равнялась спектральной ширине линии излучения лазера, равен 28 %. То есть применение интерферометра для сходящегося пучка приводит к появлению потерь излучения. Они обусловлены тем, что для части лучей, падающих под определенными углами, условие максимума не выполняется, и эти лучи отражаются.

Эффективность работы интерферометра Фабри-Перо в качестве селектора лазерного излучения подтвердили следующим образом. Свет вольфрамовой лампы накаливания проходил через полосовой светофильтр. После чего его спектр представлял собой полосу в интервале длин волн от 600 до 650 нм. При помощи полупрозрачного зеркала этот пучок света совмещался с пучком He-Ne лазера. Пройдя интерферометр, излучение попадало на фотоприемник. В течение эксперимента исследовалось пропускание интерферометром как лазерного и фонового излучений отдельно, так и суммарного излучения лазера и фона. Для зеркал с коэффициентом отражения 0,71 коэффициент пропускания фонового излучения составил 10 %. Для зеркал с коэффициентом 0,98–0,6 %. Полученный результат говорит о том, что, в соответствии с теорией, через интерферометр проходит только то излучение, спектр которого соответствует аппаратурной ширине ИФП, и его доля составляет 10 % для зеркал с коэффициентом 0,71. Однако если использовать два интерферометра Фабри-Перо, стоящих друг за другом, можно добиться степени ослабления фонового излучения сравнимой с величиной контраста одного из интерферометров. Для этого необходимо, чтобы коэффициенты отражения зеркал для каждого интерферометра слегка отличались, а расстояния между зеркалами выбирались такими, чтобы аппаратурные ширины интерферометров были одинаковыми. В этом случае спектр излучения, прошедшего оба интерферометра будет представлять собой только одну спектральную линию, обусловленную аппаратурной шириной интерферометров (рис. 5).

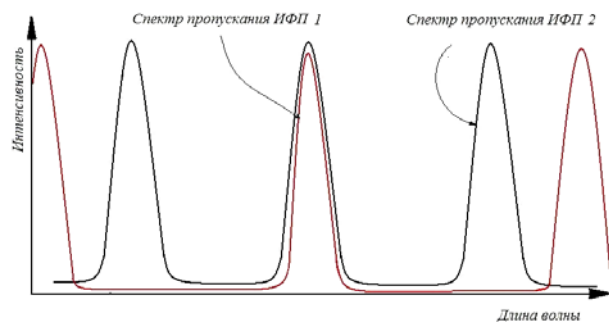


Рис. 5. Принцип работы светофильтра на основе двух интерферометров Фабри-Перо

Так же было определено, что наличие фонового излучения не оказывает влияния на пропускание лазерного излучения интерферометром и наоборот.

Для регистрации слабых сигналов очень важно, чтобы интерферометр не вносил искажения в про-

пространственное распределение излучения, чтобы его можно было сфокусировать в пятно минимальных размеров.

На рис. 6а представлено изображение пятна в фокусе объектива, полученное камерой. После установки перед объективом интерферометра камера по-прежнему регистрировала пятно прежних размеров, как показано на рис. 6б. При перемещении камеры по направлению к объективу и наоборот, наблюдалось увеличение размера пятна, что говорит о том, что интерферометр в данном случае не повлиял на положение фокальной перетяжки. После этого интерферометр был установлен между объективом и фотокамерой так, что через него проходил сходящийся пучок. При этом камера вместо пятна стала регистрировать интерференционные кольца. Но, сдвинув камеру по направлению от объектива, мы вновь зарегистрировали пятно прежних размеров. То есть, присутствие интерферометра в сходящемся пучке не вносит аберраций, но смещает положение перетяжки по направлению от объектива.

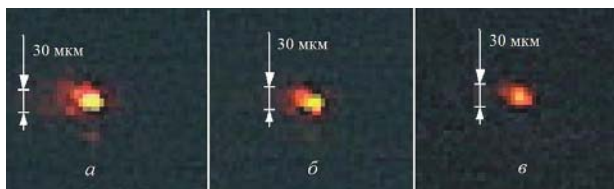


Рис. 6. Пространственное распределение интенсивности сфокусированного лазерного излучения, полученное при помощи фотокамеры Electronic Eye: а) в фокусе линзы (без интерферометра); б) в фокусе линзы (излучение прошло ИФП и затем было сфокусировано линзой); в) излучение было сфокусировано линзой и прошло ИФП, установленный до ее фокуса

Таким образом, для селекции лазерного излучения и ослабления фоновой засветки целесообразно применять интерферометр Фабри-Перо. Для наилучшей селекции (достижения максимального соотношения «сигнал/фон») стоит выбирать лазер с наименьшей спектральной шириной линии излучения. Например, химический кислородно-йодный лазер, спектральная ширина линии излучения которого составляет примерно 0,002 нм. Для наших экспериментальных условий достаточно иметь спектральную полосу селектора 0,03 нм. Поэтому коэффициенты отражения зеркал и расстояние между ними выбирались такими, чтобы аппаратная ширина ИФП была равна 0,03 нм. Так как необходимо возможно сильнее ослабить фоновое излучение, величину контраста стоит выбирать как можно больше, а величину  $w$  – как можно меньше. Зависимость контраста и отношения величины аппаратной ширины ИФП к области свободной дисперсии показаны на рис. 7, 8. Из рисунков видно, что увеличение контраста и уменьшение  $w$  происходит с увеличением коэффициента отражения зеркал. Исходя из того, что фоновое излучение необходимо ослабить примерно в 50–100 раз,  $w$  должно быть пример-

но 0,01. Следовательно, зеркала должны иметь коэффициент отражения 0,94–0,97. Ситуация осложняется тем, что при увеличении коэффициента отражения зеркал для сохранения величины аппаратной ширины ИФП необходимо уменьшать расстояние между зеркалами, а слишком малое расстояние становится сложно выдержать с достаточной точностью. Приемлемое наименьшее расстояние между зеркалами составляет 0,3 мм, так как его можно обеспечить при помощи кольца, которое входит в стандартный комплект интерферометра. Видимо, существует возможность изготовить более тонкие кольца, но это приведет к увеличению стоимости конструкции. Кроме того, изменяя показатель преломления среды между зеркалами, можно добиться увеличения требуемого оптического пути между ними. Для расстояния между зеркалами, равного 0,3 мм, и аппаратной ширины ИФП, равной 0,03 нм, коэффициент отражения зеркал должен быть равным 0,97. С увеличением коэффициента отражения зеркал увеличиваются требования к качеству зеркал и точности выставления зазора между ними. В современных условиях увеличение требований к качеству изготовления зеркал увеличивает их стоимость.

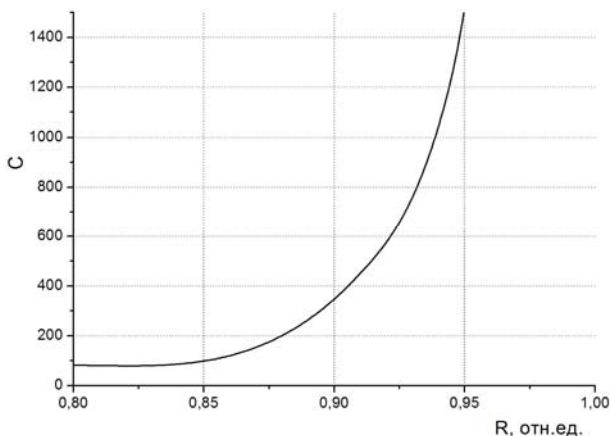


Рис. 7. Зависимость величины контраста ИФП от коэффициента отражения зеркал интерферометра

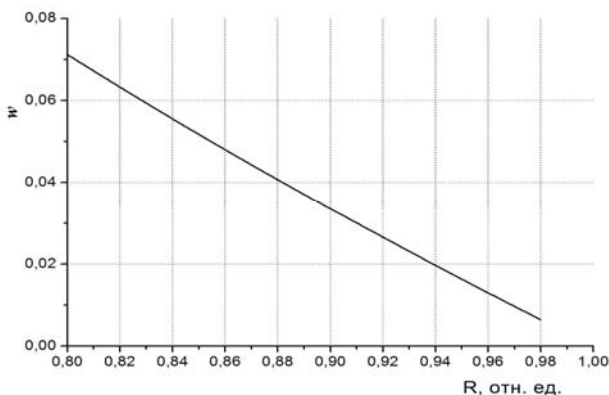


Рис. 8. Зависимость величины отношения аппаратной ширины к области свободной дисперсии ИФП от коэффициента отражения зеркал интерферометра

Потери, связанные с возможным отклонением лазерного пучка от оси телескопа, можно оценить, зная зависимость коэффициента пропускания интерферометра от угла падения на него излучения. Из рис. 9 видно, что при любом коэффициенте отражения зеркал для одной и той же аппаратурной ширины зависимость коэффициента пропускания ИФП от угла падения на него излучения остается постоянной вплоть до 0,01 рад. И угол, для которого интенсивность излучения уменьшается в 2 раза, составляет 0,005 рад. В случае же, если пучок отклонится на угол 0,001 рад, интенсивность излучения на выходе уменьшится только на 0,2 %. Такая угловая неопределенность является приемлемой для системы регистрации.

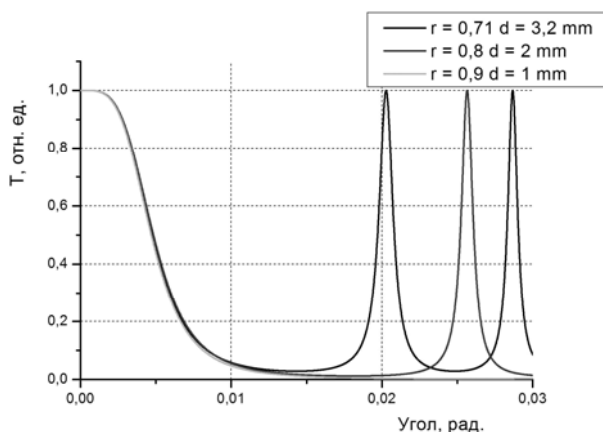


Рис. 9. Зависимость коэффициента пропускания ИФП от угла падения на него излучения при различных расстояниях между зеркалами и коэффициентах отражения зеркал, но при постоянной аппаратурной ширине, равной 0,03 мм

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- интерферометр Фабри-Перо может использоваться как светофильтр, селективирующий рабочее лазерное излучение и ослабляющий излучение фона;
- применяя один ИФП, можно достичь ослабления фонового излучения в 50–100 раз, практически не ослабляя регистрируемого рабочего излучения;
- если ставить ИФП в параллельный пучок, то степень пропускания его остается примерно постоянной при углах падения излучения вплоть до  $10^{-3}$  радиан;
- в сходящемся пучке пропускание ИФП в 3 раза меньше, чем в параллельном;
- интерферометр не оказывает влияния на пространственное распределение излучения в дальней зоне.

## Литература

1. Жиглинский А. Г., Кучинский В. В. Реальный интерферометр Фабри-Перо. Л-д, 1983.
2. Засов А. В. Лабораторное исследование эталона Фабри-Перо. <http://www.heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zasov/>.
3. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М., «Наука», 1976.
4. Розенберг Г. В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры. Успехи физических наук. Т. XLVII. Вып. 2. 1952.
5. Фабелинский И. Л. Молекулярное рассеяние света. М., «Наука», 1965.
6. Хирд Г. Измерение лазерных параметров. М., «Мир», 1970.

# ВЛИЯНИЕ МОДУЛИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕТЕПЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА УРОВЕНЬ СПОНТАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ И ВЕГЕТАТИВНЫЙ СТАТУС КРУПНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

В. В. Баркин, С. В. Наумова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В современных условиях научно-технического прогресса в результате развития различных видов энергетики и промышленности электромагнитные излучения (ЭМИ) занимают одно из ведущих мест по своей экологической и производственной значимости среди других факторов окружающей среды. Активно обсуждаемой проблемой является оценка опасности влияния на здоровье человека технических средств мобильной связи, использующих частоту 900 и 1800 МГц. Допустимый уровень излучения базовых станций мобильной связи (суммарный уровень от всех источников) в России составляет 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Временно допустимый уровень от мобильных радиотелефонов определен 3 мкВт/см<sup>2</sup> [1, 2].

Наиболее полное представление о влиянии возмущающего фактора на живой организм позволяют сделать результаты оценки функционального состояния регуляторных систем организма – центральной и вегетативной нервной системы. Физиологические и ритмологические различия между крупными и мелкими млекопитающими обуславливают сложности экстраполяции результатов, полученных в экспериментах с крысами, на человека. Это заставило использовать в исследованиях свиней – биообъект, наиболее приближенный с физиологической точки зрения к человеку.

Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование влияния низкоинтенсивного модулированного ЭМИ с плотностью потока энергии 50 и 10 мкВт/см<sup>2</sup> на вегетативный статус и уровень спонтанной двигательной активности свиней.

## Материалы и методы

В настоящем эксперименте исследовали влияние низкоинтенсивного модулированного СВЧ излучения с частотой 1 ГГц и максимальной (пиковой) ППЭ 10 и 50 мкВт/см<sup>2</sup>. В качестве источника воздействия использовали лабораторную СВЧ установку с антенной рупорного типа.

Объектами исследования являлись свиньи в возрасте 1,5–2,0 месяцев, массой 16–25 кг, в количестве 8 голов (5 самцов и 3 самки). Оценивали динамику вегетативного статуса и уровень спонтанной двигательной активности животных во время воздействия.

Работы со свиньями производили в условиях частичной иммобилизации, позволяющей осуществлять необходимые операции (крепление кардиографических электродов) и обеспечивающей относительно постоянное положение объекта относительно источника излучения. Животных размещали в деревянном станке-носилках и фиксировали стропами в торакальной и люмбальной (грудной и поясничной) областях. Станок помещали в экспериментальную камеру площадью 4,70 м<sup>2</sup> (1,20 × 3,90 м) в условиях искусственного освещения.

Во время воздействия животных размещали на расстоянии ≈ 1,07 м от источника излучения (апертуры рупорной антенны) и подвергали сериям из трех 10-минутных воздействий, разделенных техническими паузами (по 5–12 минут). Регистрацию биологических параметров проводили в течение всего времени нахождения животного в экспериментальной камере. Проводили сеансы контрольных измерений.

Уровень спонтанной двигательной активности (СДА) свиней исследовали с применением специально разработанной методики полуавтоматизированной регистрации моторных реакций. Регистрировали «тотальные» проявления двигательной активности (интенсивные движения конечностями, головой, туловищем, попытки освободиться) (табл. 1). Также отмечали наличие нестандартных поведенческих актов.

Таблица 1

Описание и характеристика статистических показателей интенсивности реакции психомоторного возбуждения

Показатель	Единица измерения	Расшифровка
ИР-СДА	%	<i>Интенсивность реакций спонтанной двигательной активности – отношение суммарной длительности всплеск СДА ко времени регистрации</i>
СПР-СДА	с	<i>Средняя продолжительность реакций спонтанной двигательной активности – средняя арифметическая длительности всплеск СДА</i>
ЧР-СДА	мин <sup>-1</sup>	<i>Частота всплеск реакций спонтанной двигательной активности – отношение количества актов реакции ПМВ ко времени регистрации</i>



Оценку функционального состояния вегетативной нервной системы (ВНС) проводили путем исследования вариабельности сердечного ритма (ВСР) по методу вариационной пульсометрии Р. М. Баевского [3]. Оценивали динамику геометрических параметров гистограмм распределения величины  $RR$ -интервалов во время проведения сеансов ЭМИ-воздействия [4, 5]. Проводили расчет показателей:  $BP$  ( $\Delta X$ ) – вариационный размах,  $Mo$  – мода,  $AMo$  – амплитуда моды,  $IN$  – индекс напряжения,  $ИВР$  – индекс вегетативного равновесия,  $ПАПР$  – показатель адекватности процессов регуляции,  $ВПР$  – вегетативный показатель регуляции. Регистрацию и обработку кардиосигнала проводили средствами программно-аппаратного комплекса регистрации «Поли-спектр – 8E/8B». Запись электрокардиограммы проводили в шести стандартных отведениях.

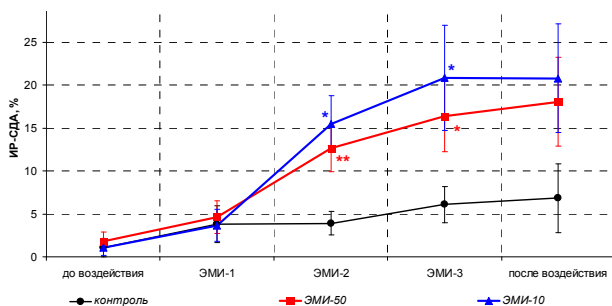
Сравнение между экспериментальными и контрольными группами проводили стандартными методами. Оценку статистически значимых различий проводили с использованием  $t$  – критерия Стьюдента, [6].

## Результаты и обсуждение

### Влияние модулированного ЭМИ на уровень спонтанной двигательной активности

Комплекс показателей интенсивности моторных реакций животных, подвергавшихся воздействию ЭМИ в начале периода наблюдения (исходный статус и первое 10-минутное воздействие) соответствовал данным контрольных измерений.

Во время второго и третьего 10-минутных воздействий относительная продолжительность реакций СДА животных, подвергавшихся ЭМИ-воздействию, заметно превышала показатели в контрольных сериях (рис. 1). При воздействии с ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup> увеличение составило 3,2 и 2,7 раз соответственно ( $p \leq 0,01$  и  $p \leq 0,05$ ). При ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup> увеличение составило 4,0 и 3,4 раз соответственно ( $p \leq 0,05$ ).



\* и \*\* – отличие от контроля с достоверностью соответственно  $p \leq 0,05$  и  $p \leq 0,01$

Рис. 1. Интенсивность реакций спонтанной двигательной активности (ИР-СДА)

Статистически значимые отличия показателя СР-СДА были зарегистрированы во время второго

и третьего 10-минутных воздействий (рис. 2). При воздействии ЭМИ с ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup> наблюдали увеличение показателей в 2,2 и 2,1 раза соответственно (при  $p \leq 0,01$  и  $p \leq 0,05$ ). При ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup> во время второго 10-минутного воздействия наблюдали увеличение показателя СР-СДА в 2,7 раза ( $p \leq 0,05$ ) и в 2,0 раза ( $p \leq 0,05$ ) – во время третьего. После окончания воздействия отклонения оставались на прежнем уровне.

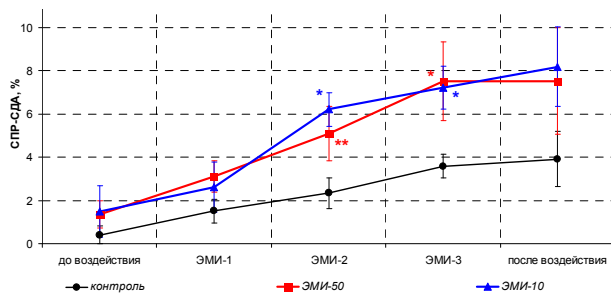


Рис. 2. Средняя продолжительность актов реакций спонтанной двигательной активности (СР-СДА)

Исследование динамики частоты реакций СДА показало увеличение исследуемого показателя в 2,2 раза у животных, подвергавшихся ЭМИ-воздействию, относительно контроля (рис. 3). При этом, статистически значимые отличия зарегистрировали в период времени, соответствующий второму 10-минутному воздействию ( $p \leq 0,05$ ). В оставшееся время наблюдения степень выраженности выявленных отклонений от контроля продолжала оставаться на достаточно заметном уровне. После воздействия с ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup> увеличение показателя ЧР-СДА увеличилось в 2,1 раза.

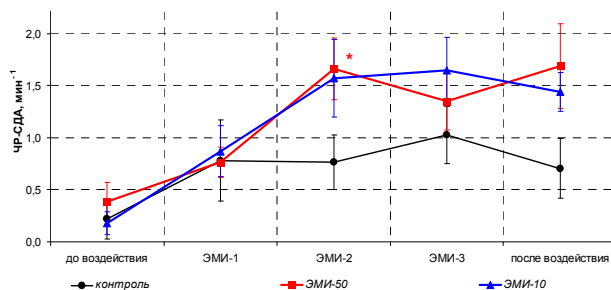


Рис. 3. Частота вспышек реакций спонтанной двигательной активности (ЧР-СДА)

Таким образом, установили, что воздействие модулированного ЭМИ с максимальной плотностью потока энергии 50 и 10 мкВт/см<sup>2</sup> приводило к заметному изменению уровня СДА свиней, которое проявлялось как при сопоставлении показателей экспериментальной и контрольной выборок, так и при исследовании контрастности смены состояний внутри выборки экспериментальных серий (табл. 2).

Наряду с этим отмечали повышение эмоциональности и увеличение интенсивности нестандартных реакций: признаки беспокойства, подергивания конечностями, вокализация. По мере реализации сеанса воздей-

ствия отмечали увеличение продолжительности и интенсивности реакций, усложнение их репертуара (признаки агрессии, вокализация, попытки освободиться).

Таблица 2

Направленность отклонения показателей

ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup>	Направленность отклонение параметра (максимальная величина, %)		
	ИПМВ	СПР-ПМВ	ЧР-ПМВ
50	↑	↑	↑
	до 223 % ( $p \leq 0,01$ )	до 118 % ( $p \leq 0,01$ )	до 117 % ( $p \leq 0,05$ )
10	↑	↑	↑
	до 300 % ( $p \leq 0,05$ )	до 165 % ( $p \leq 0,05$ )	до 105 % ( $p \leq 0,05$ )

Полученный эффект проиллюстрирован на рис. 4, где в графической форме отражена динамика психофизиологического состояния свиней, подвергавшихся воздействию модулированного СВЧ излучения с максимальной плотностью потока энергии 50 мкВт/см<sup>2</sup> в сравнении с контролем (на примере одного из животных).

### Влияние модулированного ЭМИ на вегетативный статус

При исследовании динамики гистограмм распределения величины *RR*-интервалов животных в сериях контрольных измерений (рис. 5) наблюдали постепенное увеличение вариационного размаха гистограммы (в конце сеанса на 33 %) и снижение величины ИН (на 55 %) при стабильном значении *Mo* и *АМо*. Это соответствует типичной картине стабилизации сердечного ритма по мере успокоения животного, исходно находящегося в состоянии эмоционального возбуждения на фоне повышенного симпатического тонуса, возникшего вследствие стресса, вызванного заневолонированием.

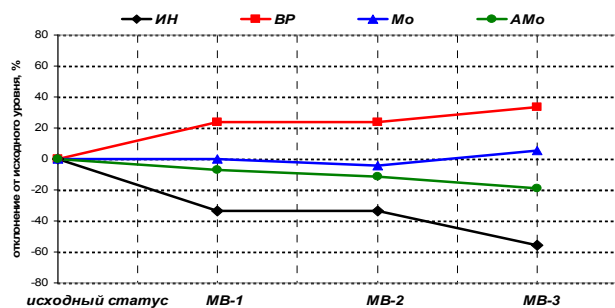


Рис. 5. Динамика основных характеристик гистограммы распределения величины *RR*-интервалов животных во время проведения сеансов многократного воздействия

Анализ показателей ВСР показал наличие дестабилизирующего влияния ЭМИ с максимальной ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup> на функционирование ВНС свиней (рис. 6). Это проявилось, прежде всего, в снижении ИН (до 48 %),

увеличении вариационного размаха гистограммы на 39 %. Наиболее заметные отклонения показателей от исходного уровня регистрировали в течение первого и второго 10-минутных воздействий. В конце сеансов воздействия наблюдали некоторую стабилизацию показателей ИН и ВР. Полученные изменения указывают на смещение баланса ВНС в сторону преобладания роли парасимпатического отдела. Таким образом, наблюдали формирование процесса, аналогичного протекавшему в контрольных исследованиях. Однако, ближе к концу сеансов воздействия отмечали снижение величины *Mo*, т. е. смещение вершины гистограммы влево, что свидетельствовало об увеличении симпатического тонуса, которое, по-видимому, и следует рассматривать как собственно реакцию ВНС на ЭМИ-воздействие. Подтверждение этого можно найти при оценке динамики вторичных показателей гистограммы.

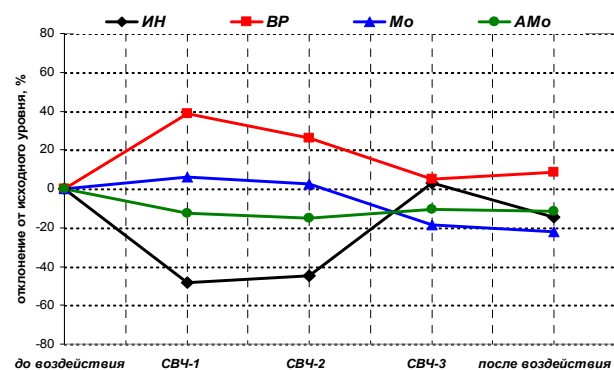
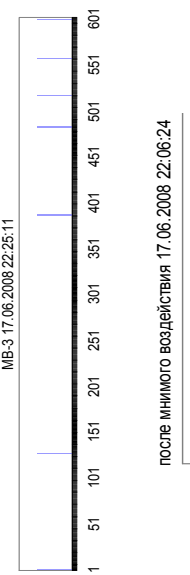
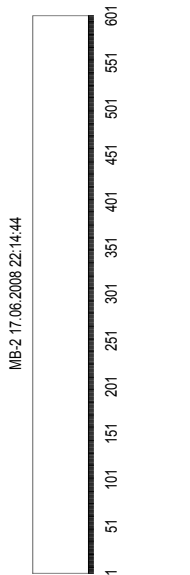
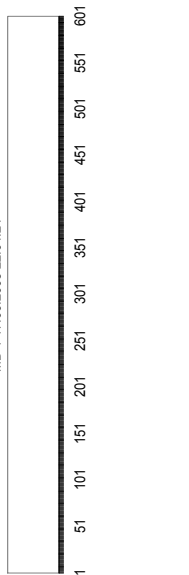
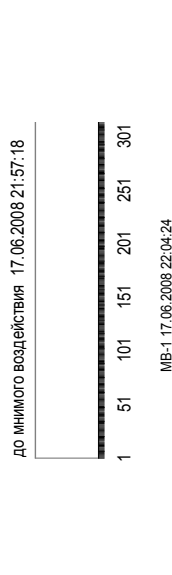


Рис. 6. Динамика основных характеристик гистограммы распределения величины *RR*-интервалов животных во время проведения сеансов воздействия модулированным СВЧ излучением с максимальной ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup>

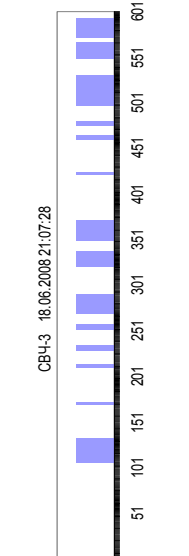
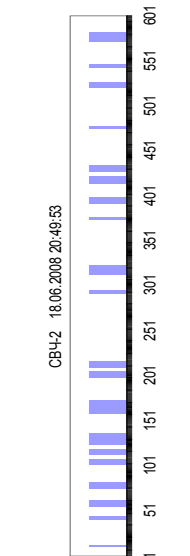
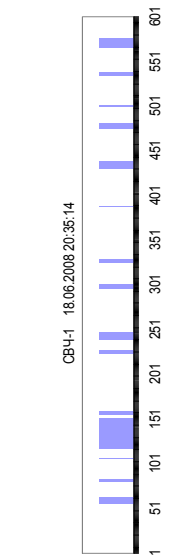
Оценка внешнего вида гистограмм позволяет более детально понять характер ответной реакции ВНС на ЭМИ-воздействие (рис. 8). Смещение гистограммы влево, уменьшение *Mo* и тенденция к снижению *АМо* сопровождалась на отдельных этапах воздействия формированием гистограмм «неправильной» формы: многовершинной и, реже, эксцессивной [3–5]. Изменения, наблюдавшиеся на фоне колебания величины вариационного размаха гистограммы, свидетельствуют о развитии в системе переходных процессов, протекающих на фоне повышения симпатического тонуса (третье 10-минутное воздействие). Исследование динамики показателей ВСР свиней, подвергавшихся воздействию модулированного ЭМИ с ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup>, позволило установить несколько иной порядок формирования ответной реакции ВНС (рис. 7). В процессе реализации воздействия вначале отмечали снижение величины ИН (первое 10-минутное воздействие), а затем – увеличение. Наблюдаемая картина, по-видимому, обуславливается сменой состояний: адаптации животного к условиям иммобилизации, успокоение, затем – возбуждения, собственно реакцией на ЭМИ-воздействие. При этом наблюдали развитие общей тенденции к уменьшению показателя ВР.



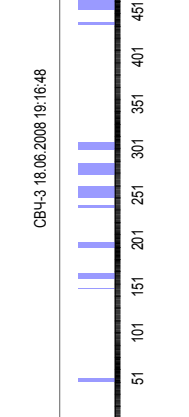
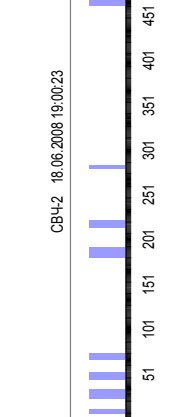
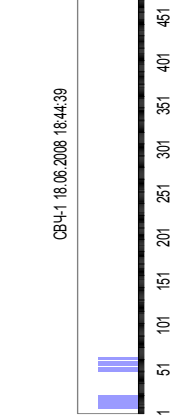
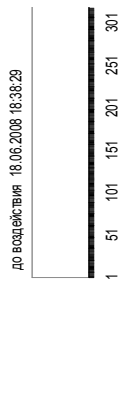
### Минимое воздействие



### СВЧ-50



### СВЧ-10



Длина прямоугольников (по горизонтальной оси) отражает длительность реакции спонтанной двигательной активности объект № 3.

Рис. 4. Динамика распределения интенсивности реакций спонтанной двигательной активности и эмоционального возбуждения психофизиологического состояния свиней, подвергавшихся воздействию модулированного ЭМИ в сравнении с контролем

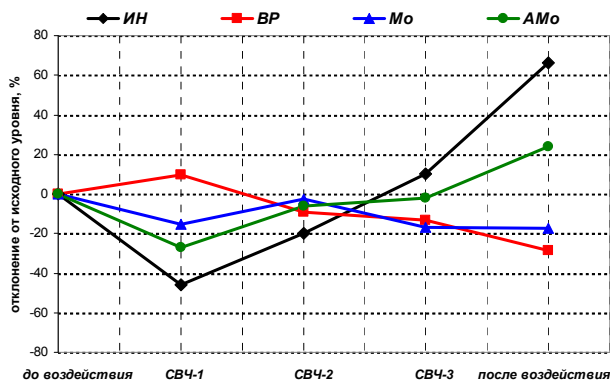


Рис. 7. Динамика основных характеристик гистограммы распределения величины  $RR$ -интервалов животных во время воздействия модулированным ЭМИ с максимальной ППЭ  $10 \text{ мкВт/см}^2$

Уменьшение  $Mo$ , в сочетании с тенденцией к увеличению  $AMo$ , указывает на повышение активности

симптоадrenalовой системы и, как следствие, возрастание роли симпатического отдела в регуляции сердечной деятельности. Динамики вторичных показателей гистограммы (увеличение ПАПР, ВПР, ИВР) также свидетельствовала о повышении симпатического тонуса и увеличении уровня централизации управления сердечного ритма.

Наблюдаемые изменения хорошо иллюстрируются на примере динамики гистограммы распределения величины  $RR$ -интервалов одного из объектов (рис. 8). На рисунке отчетливо видна тенденция к смещению гистограммы влево. Стоит подчеркнуть достаточно быстрое формирование ответной реакции организма на воздействие, проявившееся в формировании устойчивой тенденции к увеличению симпатического тонуса. Отмечаемые многовершинность и асимметричность гистограмм свидетельствовали о нарушении стационарности процессов нейровегетативной регуляции [3–5].

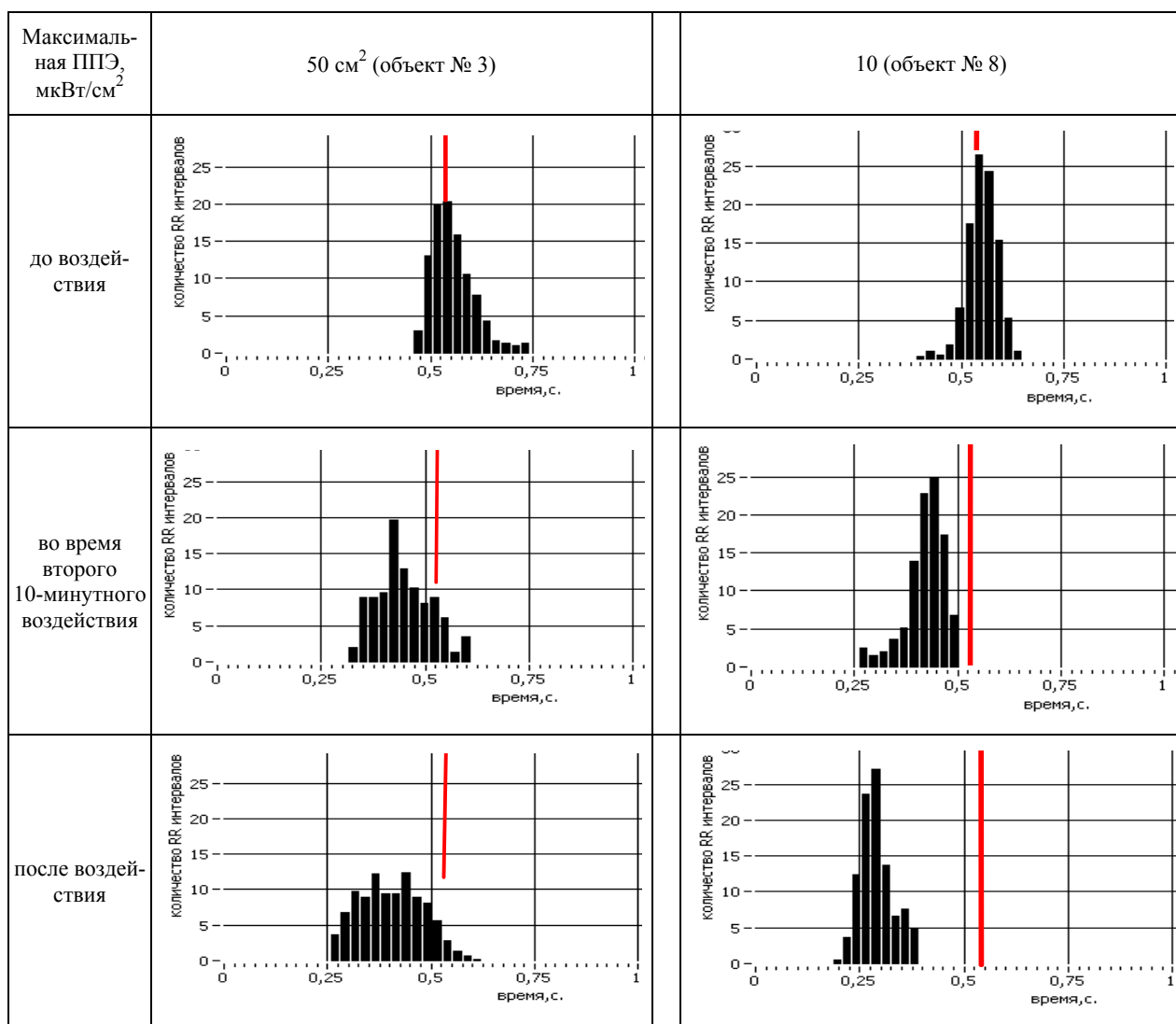


Рис. 8. Динамика гистограммы распределения величины  $RR$ -интервалов во время проведения сеанса воздействия модулированным ЭМИ

1. Воздействие модулированного ЭМИ приводило к заметному увеличению уровня спонтанной двигательной активности. Зарегистрировали увеличение интенсивности моторных реакций ЭМИ с ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup> – в 3,2 раза ( $p \leq 0,01$ ), с ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup> – в 4,0 раза ( $p \leq 0,05$ ). Наиболее выраженный эффект отмечали в период времени, соответствующий второму 10-минутному воздействию.

2. Электромагнитное излучение с максимальной плотностью потока энергии 50 и 10 мкВт/см<sup>2</sup> приводило к увеличению роли симпатического отдела в регуляции сердечной деятельности. Нарушение вегетативного баланса регистрировали начиная, соответственно, с третьего и второго 10-минутных воздействий.

3. Более заметные изменения функционирования вегетативной нервной системы наблюдали при воздействии ЭМИ с ППЭ 10 мкВт/см<sup>2</sup>, тогда как действие ЭМИ с ППЭ 50 мкВт/см<sup>2</sup> в большей степени сказывалось на увеличении уровня спонтанной двигательной активности. В целом, наблюдаемые *состояния животных можно определить как состояние психоэмоционального напряжения сопровождающегося нарушением вегетативного баланса* [7].

1. Дунаев В. Н. Электромагнитные излучения и риск популяционному здоровью при использовании средств сотовой связи // Гигиена и санитария. № 6, 2007. С. 56–57.
2. Григорьев Ю. Г. Гигиена и санитария. № 3, 2003. С. 14–16.
3. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984.
4. Яблучанский Н. И., Кантор Б. Я., Мартыненко А. В. Вариабельность сердечного ритма в современной клинике. Харьков: Основа, 2001.
5. Гаврилушкин А. П., Медведев А. П., Киселев С. В. и др. Геометрический анализ нелинейных хаотических колебаний в оценке вариабельности сердечного ритма. Нижний Новгород: Нейрософт, 2001.
6. Гланц С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц. М.: Практика, 1999.
7. Бодров В. А. Информационный стресс. М.: ПЕР СЭ, 2000.

# СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08Х18Н10Т В ОБЛАСТИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

А. В. Вертей, И. Л. Малков, А. А. Юхимчук

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Теоретическая и экспериментальная часть

Целью данного исследования является изучения влияния давления водорода на кинетические параметры водородопроницаемости (ВП) нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

Методика определения кинетических параметров ВП конструкционных материалов (КМ) основана

на анализе изменения теплопроводности газа-носителя, омывающего выходную поверхность исследуемого образца, вследствие растворения в газе-носителе продифундировавшего через образец водорода. Устройство установки [1] позволяет получать параметры ВП сразу для трех образцов, принципиальная схема приведена на рис. 1.

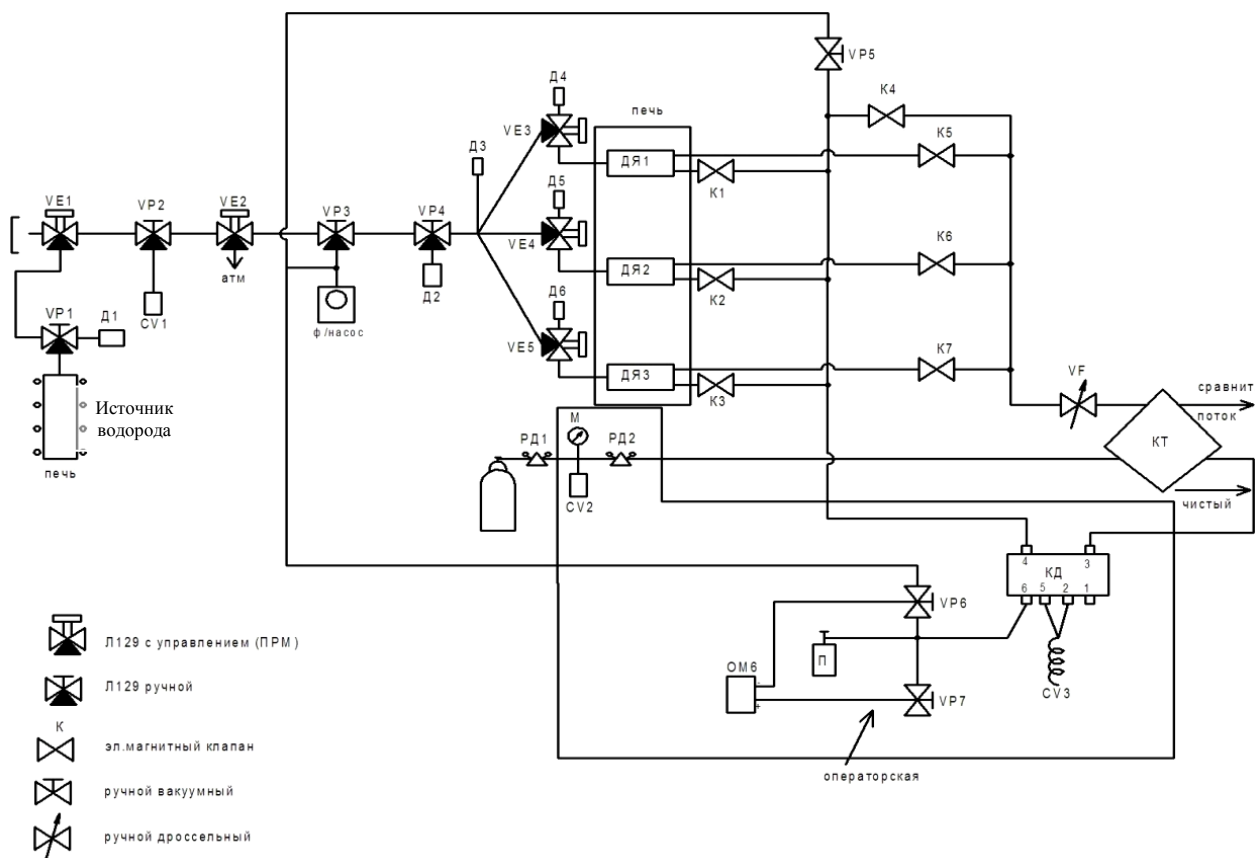


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследований ВП КМ: ДЯ – диффузионная ячейка; К1–К7 – электромагнитный клапан; VF – ручной дроссельный вентиль; КТ – катарометр; КД – кран-дозатор; CV3 – мерный объем; VP1–VP7 – ручной вентиль; VE1–VE5 – вентиль с электромеханическим приводом; РД1, РД2 – редуктор; CV1, CV2 – буферная емкость; Д1, Д3–Д6 – датчики типа AP-17; Д2 – вакуумный датчик; ОМ6 – оптический манометр; П – пробоотборник; ф/насос – форвакуумный безмасляный насос GVSP-30

При проведении исследований измерялись и определялись следующие параметры водородопроницаемости:

- 1) коэффициент ВП  $P_H$ ;
- 2) коэффициент диффузии  $D_H$ ;
- 3) растворимость  $S_H$ .

Исследования ВП проводились при давлениях водорода от 6 до 72 МПа и температуре 300 °С в интегральном режиме измерений. Данные условия исследований (давления и температура) были выбраны, исходя из основных характеристик материала и геометрии образца (рис. 2).

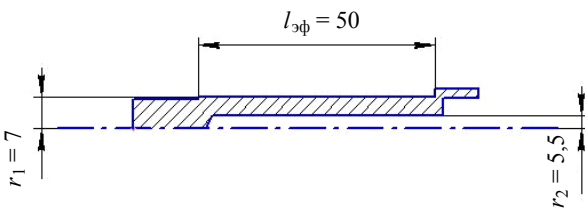


Рис. 2. Основные геометрические параметры образца

Основные геометрические размеры образца:

$l_{эф}$  – эффективная длина образца;

$r_1, r_2$  – наружный и внутренний радиус образца;

$c$  – средняя длина окружности рабочей цилиндрической части  $\pi(r_1 + r_2)$ ;

$S_{пов}$  – средняя рабочая площадь поверхности образца:  $S_{пов} = cl_{эф}$ .

Основные параметры ВП рассчитывались следующим образом.

Величина потока,  $\Pi_H$ , определялась по формуле:

$$\Pi_H = Q_H / \Delta t,$$

где  $Q_H$  – количество водорода протиффундировавшего сквозь образец;  $\Delta t$  – время накопления водорода на выходной стороне ячейки.

Коэффициент водородопроницаемости цилиндрического образца,  $P_H$ , определялся по формуле:

$$P_H = \Pi_H \frac{(r_1 - r_2)}{(r_1 + r_2)l_{эф}},$$

где  $\Pi_H$  – поток водорода,  $\text{см}^3/\text{с}$ ; геометрические размеры образца ( $l_{эф}, r_1, r_2$ ) в см.

Коэффициент диффузии определялся по формуле:

$$D_H = \frac{r_2^2 - r_1^2 + [r_1^2 + r_2^2] \ln \frac{r_1}{r_2}}{4t_k \ln \frac{r_1}{r_2}} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1},$$

где  $t_k, S_1, S_2$  определяются из графика зависимости потока от времени  $\Pi_H(t)$  рис. 3.

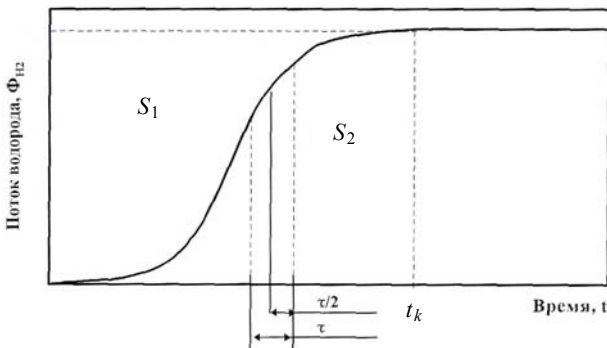


Рис. 3. Теоретическая зависимость потока от времени

Выбирая произвольную точку времени, превышающую время стабилизации потока, график разбивается на две части  $S_1$  и  $S_2$ , площади которых вычисляются для определения коэффициента диффузии водорода.

Растворимость водорода определялась косвенным путем по формуле:

$$S_H = \frac{P_H}{D_H}.$$

Напряженное состояние в стенке трубчатого образца, нагруженного наружным давлением  $P$ , определялось по формулам [2]:

$$\sigma_r = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right), \quad \sigma_\theta = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right),$$

$$\sigma_z = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2},$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  – радиальное, кольцевое и осевое напряжения.

Анализ напряженного состояния показывает, что стенка трубчатого образца находится в условиях всестороннего сжатия (рис. 4).

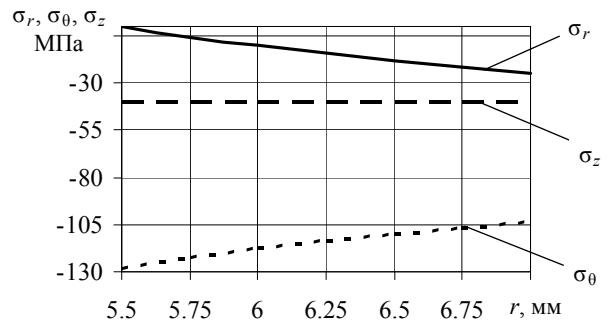


Рис. 4. Распределение напряжений по стенке образца при давлении  $P = 24,5$  МПа

Предельное состояние в стенке образца, то есть начало текучести материала, оценивалось по третьей теории прочности (условие Треска-Сен-Венана):

$$\sigma_{эКВ}^{III} = \sigma_r - \sigma_\theta = -\frac{2 \cdot P \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{(r_1^2 - r_2^2) r^2}.$$

Максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_{эКВ}^{III}$  реализуются на внутренней поверхности образца при  $r = r_2$ . Для стали 08X18H10T условный предел текучести при температуре  $300^\circ\text{C}$  равен  $\sigma_{0,2} \approx 160$  МПа [3] и предельное состояние в стенке образца  $\sigma_{эКВ}^{III} = \sigma_{0,2}$  достигается при наружном давлении  $P_{пр} \approx 30,6$  МПа (рис. 5). Напряженное состояние в стенке образца при  $P = 24,5$  МПа (упругое состояние) и при давлениях  $P = 36,1; 47,6; 55,5$  МПа,

вызывающих появление пластических деформаций, показано на рис. 6. При давлении  $P = 36,1$  МПа область пластических деформаций составляет  $\approx 0,3$  от толщины стенки образца (темно-серая область, рис. 6 в), при больших давлениях пластические деформации распространяются на всю толщину стенки образца (рис. 6 г). Таким образом, переход материала в стенке образца из упругого состояния в упруго-пластическое наступает в интервале давлений  $24,5...36,1$  МПа. На всю толщину стенки образца пластическая область распространяется при давлении  $P \approx 44$  МПа, то есть в интервале давлений  $36,1...47,6$  МПа.

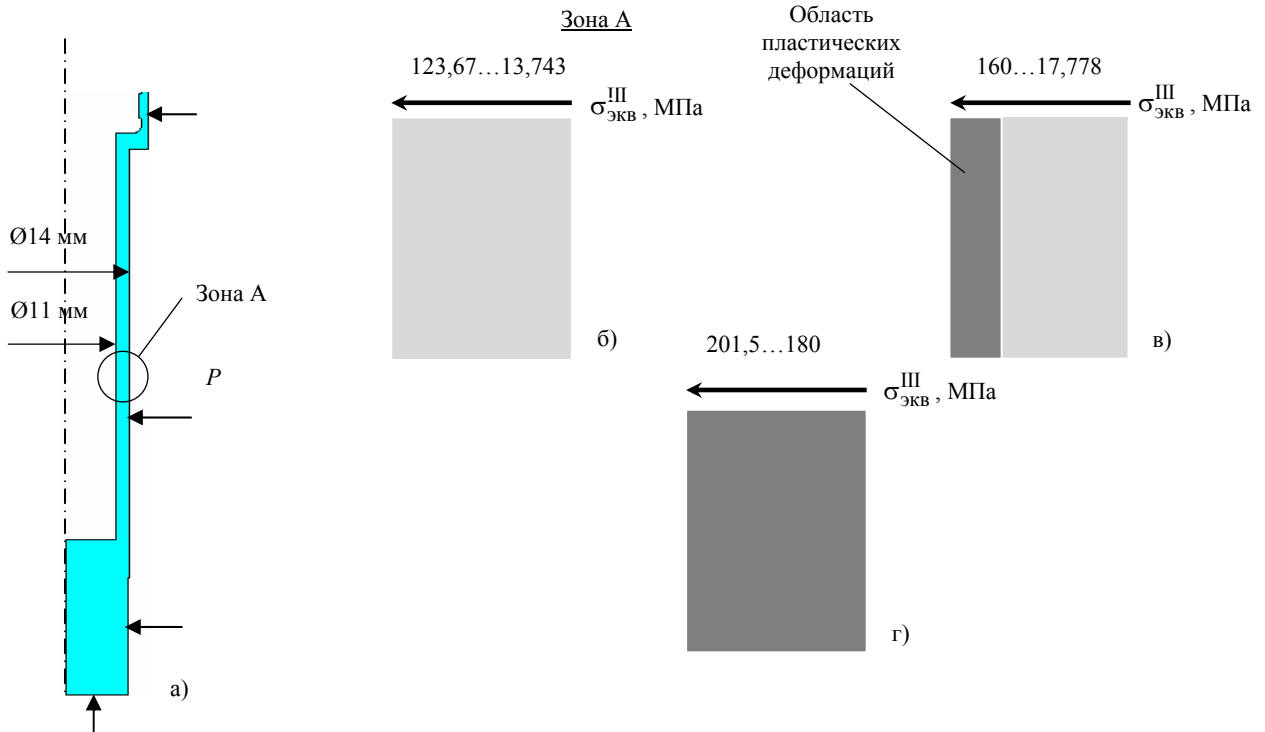
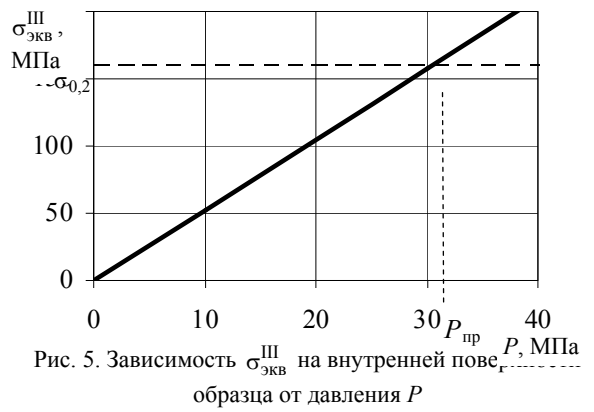


Рис. 6. Напряженное состояние в стенке образца при нагружении наружным давлением  $P$ : а) расчетная область; б)  $P = 24,5$  МПа; в)  $P = 36,1$  МПа; г)  $P = 47,6$  МПа;

## Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований ВП приведены на рис. 7. Как видно, зависимость проницаемости и растворимости от квадратного корня из давления в упругой области является практически линейной (рис. 7 а, в), т. е. отклонений от закона Сивертса не наблюдается. Исследования, описанные в работе [4], указывают на малое влияние давления водорода на коэффициент диффузии, чем и объясняется незначительный наклон прямой (рис. 7 б).

При повышении давления водорода выше давления, вызывающего появления зоны пластических деформаций, то есть  $\approx 30,6$  МПа, наблюдается скачкообразное уменьшение коэффициентов проницаемости и диффузии.

## Заключение

- Зависимость основных кинетических параметров ВП (проницаемость и растворимость) стали 08X18N10T от квадратного корня из давления является линейной в области упругих деформаций.
- При переходе от упругих к пластическим деформациям наблюдается изменение (падение) проницаемости, растворимости и диффузии водорода.
- Для определения характера данной зависимости и фактических параметров в областях упруго-пластических и пластических деформаций требуется проведение дополнительных исследований.

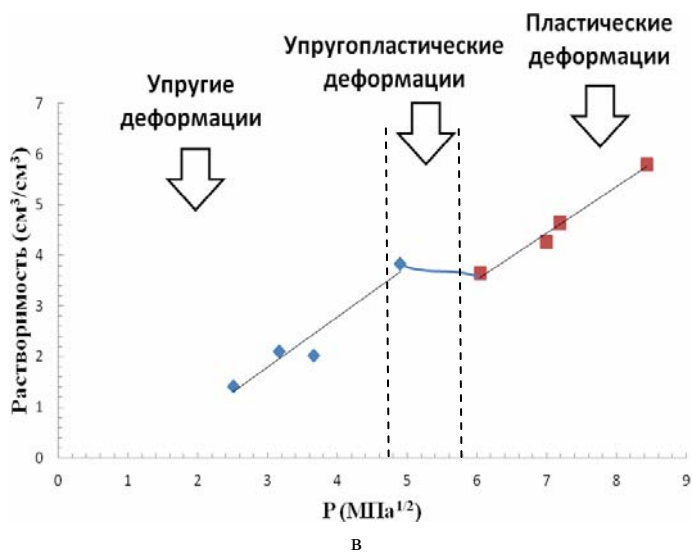
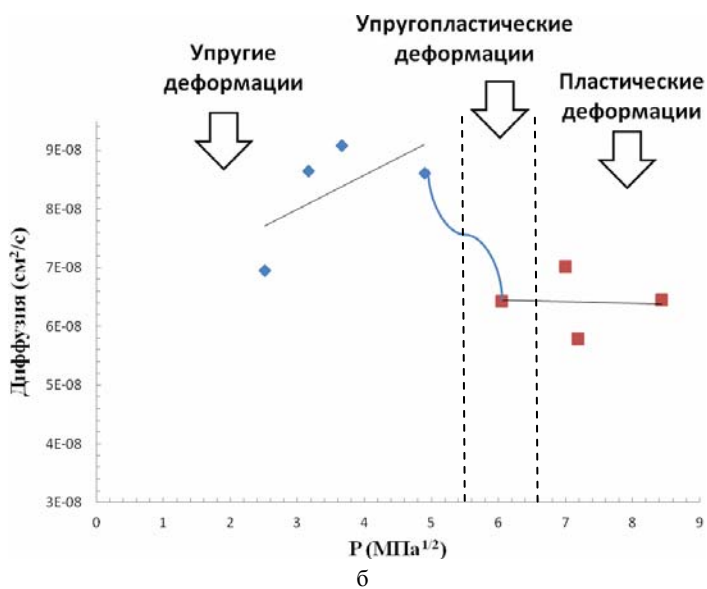
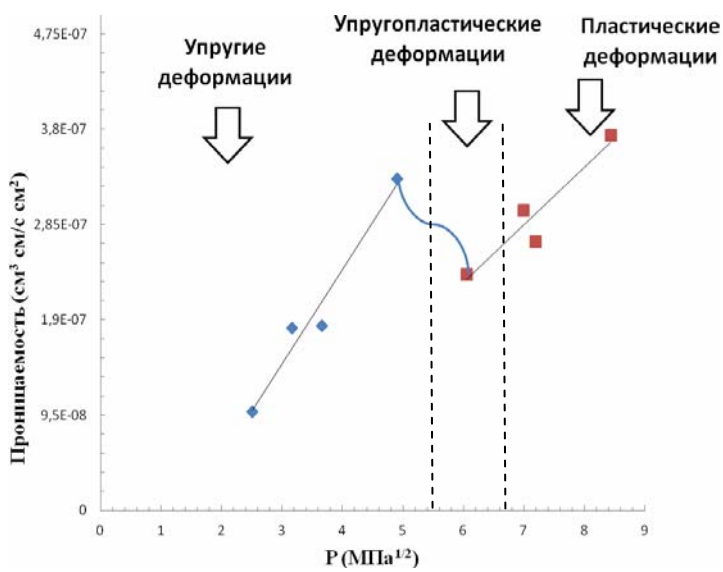


Рис. 7. Основные зависимости кинетических параметров ВП от квадратного корня из давления



## Литература

1. Вертей А. В., Фильчагин С. В., Юхимчук А. А. Установка для изучения водородопроницаемости конструкционных материалов // ИИISM'08 Четвертая международная школа молодых ученых и специалистов: Тезисы докладов. Нижний Новгород, 2008. С. 194–196.
2. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова Думка, 1975.
3. Масленков С. Б., Масленкова Е. А. Стали и сплавы для высоких температур: Справочник. Кн. 1. М.: Metallurgia, 1991.
4. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. М.: Metallurgia, 1985.

# МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ДВУМЕРНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРОЗРАЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В. А. Кротов, А. В. Виноградов, Е. В. Поздняков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Одним из ключевых моментов, определяющих характеристики излучения лазеров является качество составляющих его оптических элементов. В подавляющем числе случаев именно они определяют эти параметры.

К наиболее распространенным способам контроля качества оптических элементов и оптических трактов лазеров следует отнести гартмановские и интерферометрические методики.

Так на установке NIF [1] с применением метода Гартмана осуществляется тестирование оптического тракта лазера с последующей корректировкой фазовых искажений волнового фронта лазерного пучка с помощью адаптивной оптики.

Примером применения интерферометрической методики регистрации искажений волнового фронта в оптических элементах лазера может служить интерферометр, применяемый на установке AMPLAB [2]. С его помощью проводились измерения фазовых искажений волнового фронта, которые возникают в стеклянных дисковых активных элементах в процессе накачки.

В настоящем докладе представлены результаты разработки интерферометра, оптическая схема которого подобна схеме интерферометра [2].

Основная цель создания интерферометра это тестирование активных элементов лазера с зигзагообразным распространением излучения по активной среде [3]. Исходя из этого, была выбрана апертура интерферометра  $20 \times 20 \text{ мм}^2$  и длина тестируемого пространства 80 см.

Разработана программа обработки исходных интерферограмм. Программа позволяет получать двумерное распределение фазовых искажений в тестируемых элементах.

Следует отметить, что оптическая схема интерферометра достаточно гибкая. И поэтому при соответствующем выборе оптических элементов можно реализовать интерферометр с апертурой до  $400 \times 400 \text{ мм}^2$  и длиной тестируемого пространства в несколько метров, как это описано в работе [2].

## 1. Экспериментальный стенд

Оптическая схема интерферометра представляет собой некую модификацию известного интерферо-

метра Twyman-Green [2, 5]. Суть модификации заключается в применении в тракте опорного пучка оптоволоконного волновода. Основная цель, которая при этом преследовалась, это уменьшение величины шума в интерференционной картине, который возникает результате турбулентности при распространении в воздухе, а также механических вибрации элементов интерферометра. В интерферометре применен двойной проход по тестируемому элементу.

В рамках представленной работы создан стенд, представляющий собой такой интерферометр.

При создании стенда планировалось, что зондируемая апертура составит  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ , а длина тестируемых стеклянных элементов до 500 мм.

Оптическая схема представлена на рис. 1.

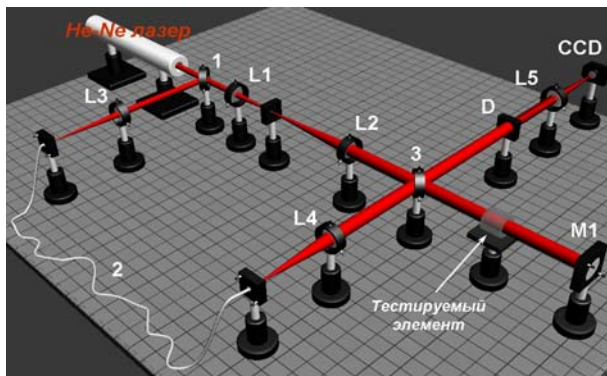


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра. Основные элементы: источник света He-Ne лазер ( $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ ); 1 – светоделитель; L1, L2 – телескоп; L3, L4 – линзы ввода и вывода излучения в оптоволоконно; 3 – клин; M1 – глухое зеркало; D – апертурная диафрагма  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ ; L5 – объектив; CCD – CCD камера  $1024 \times 1024$  пикселей

Принцип работы интерферометра. Излучение зондирующего лазера расширяется телескопом L1, L2 и направляется на тестируемый элемент. Затем отразившись от зеркала M1 и клина 3 направляется на систему регистрации – CCD камеру. Это так называемый предметный пучок. Опорный пучок формируется на трассе светоделитель 1-L3-волоконно-L4. Затем он проходит клин 3 и также подается на систему регистрации, где оба пучка интерферируют. С помощью CCD камеры с пространственным разрешением  $1024 \times 1024$  пикселей регистрируется двумерная интерференционная картина. Характерный вид картины представлен на рис. 2.

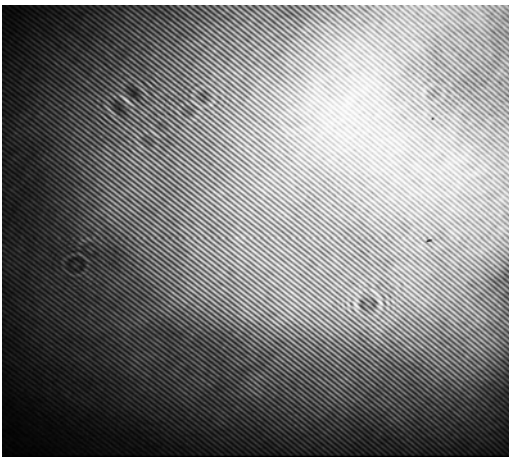


Рис. 2. Вид регистрируемой интерференционной картины

## 2. Алгоритм обработки интерференционных картин

Конечной целью экспериментов является определение величины фазовых неоднородностей тестируемых элементов. Для обработки регистрируемых интерференционных картин применен алгоритм, предложенный в работе [4]. В основе алгоритма лежит Фурье-преобразование исходного изображения с последующим анализом и выделением сигнала, несущего информацию о фазовых искажениях, обратного преобразования Фурье и выделения пространственного распределения фазовых искажений.

С аналитической точки зрения это выглядит так.

Исходную интерферограмму можно представить в виде:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_{0x}x + 2\pi f_{0y}y + \varphi(x, y)], \quad (1)$$

где  $g(x, y)$  – распределение интенсивности,  $x, y$  – пространственные координаты интерференционной картины;  $a(x, y)$  – постоянная составляющая регистрируемого изображения;  $b(x, y)$  – амплитуда интенсивности интерференционной картины,  $f_{0x}, f_{0y}$  –  $x, y$  составляющие пространственной частоты интерференционной картины и  $\varphi(x, y)$  – фазовые искажения, вносимые в регистрируемую картину тестируемым элементом, а также собственными искажениями интерферометра.

Выражение (1) можно несколько видоизменить и представить в следующем виде:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(i2\pi f_{0x}x + i2\pi f_{0y}y) + c^*(x, y) \exp(-i2\pi f_{0x}x - i2\pi f_{0y}y), \quad (2)$$

где

$$c(x, y) = (1/2)b(x, y) \exp(i\varphi(x, y)). \quad (3)$$

В 2-D Фурье пространстве выражение (2) будет представлять:

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + C^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}). \quad (4)$$

Селектируя сигнал, например,  $C$  (4), произведя обратное преобразование Фурье и проделав операцию логарифмирования, представляется возможным вычислить необходимый результат –  $\varphi(x, y)$ , т. е. фазовые искажения волнового фронта тестируемого оптического элемента:

$$\log[c(x, y)] = \log[(1/2)b(x, y)] + i\varphi(x, y). \quad (5)$$

Представленный алгоритм обработки исходных данных реализован в виде программы в среде MATLAB.

## 3. Оценка точности измерения фазовых искажений интерферометром с применяемым алгоритмом обработки интерферограмм

Для оценки точности сделано 10 регистраций фазовых искажений в «пустом» интерферометре. Интервал между регистрациями составлял около минуты.

На рис. 3 представлены фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно-перпендикулярных центральных сечениях. Величина фазовых искажений приведена в единицах длин волн зондирующего излучения (0,63 мкм) на один проход по тестируемому тракту интерферометра.

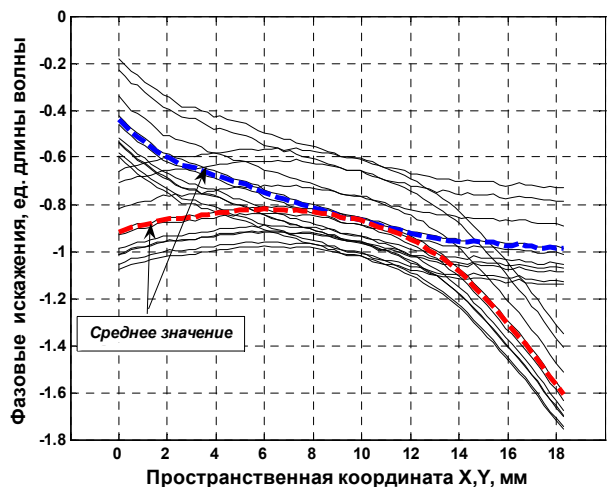


Рис. 3. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях. Выборка из 10-и экспериментов

Как видно из графика, регистрации имеют достаточно большой разброс. Среднеквадратичное отклонение составляет около  $0,15\lambda$  (см. рис. 4). Види-

мо, столь высокий разброс связан с присутствующими при регистрациях механическими вибрациями помещения и самого стэнда.

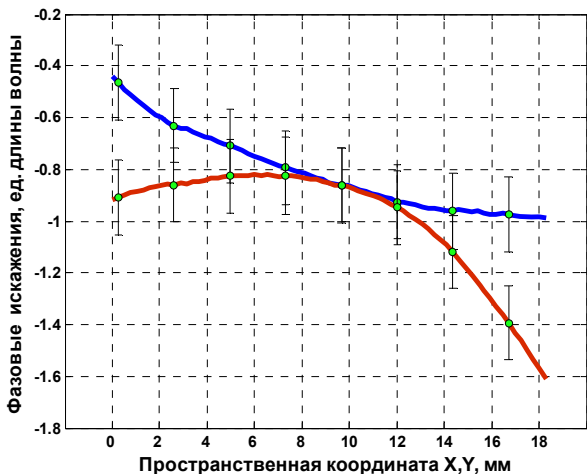


Рис. 4. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение

Однако следует заметить, что общий характер регистрируемых фазовых искажений подобен.

При практическом применении интерферометра его основное назначение это определение фазовых искажений в тестируемых элементах в относительных единицах, т. е. относительно какой-либо фиксированной точки поля зрения интерферометра.

Поэтому мы вправе приравнять фазу какой-либо точки поля зрения интерферометра к нулю (например, центр) и оценить точность регистрации в относительных единицах. В этом случае (см. рис. 5) интересующая нас точность регистрации (среднеквадратичное отклонение) будет составлять  $0,007\lambda$ .

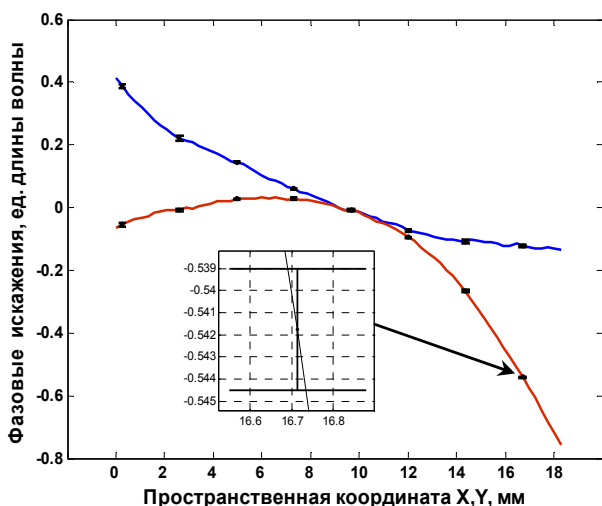


Рис. 5. Фазовые искажения в «пустом» интерферометре с нормированной фазой. Два взаимно перпендикулярные центральных сечения

Пространственное разрешение. Исходная интерферограмма регистрируется CCD камерой  $1024 \times 1024$  пикселей. Согласно алгоритму при обработке исходных данных приходится «вырезать» из исходного Фурье-спектра приблизительно одну пятнадцатую его первоначальной величины. Естественно, при обратном преобразовании Фурье на эту величину должно уменьшиться и пространственное разрешение интерферометра.

Мы полагаем, что достаточно достоверную информацию о сигнале может нести 2 последовательных пикселя изображения. В этом случае достижимое пространственное разрешение при поле зрения  $18 \times 18 \text{ мм}^2$  оценивается как  $0,5 \text{ мм}$ .

#### 4. Тестирование оптических элементов с известными параметрами фазовых искажений

С целью проверки «объективности» фиксируемых фазовых искажений с помощью интерферометра и выбранного алгоритма обработки интерферограмм были проведены регистрации искажений волновых фронтов элементами с заведомо известными параметрами. Процедура тестирования содержала два этапа. На первом этапе тестировались фазовые искажения собственно интерферометра. На втором этапе регистрировались фазовые искажения при введении в интерферометр тестируемого элемента. Истинное значение фазовых искажений тестируемого элемента определялось с учетом собственных искажений интерферометра.

Очевидно, при двухэтапной регистрации фазовых искажений тестируемых элементов (тестирование собственно интерферометра и тестирование оптического элемента), точность регистрации упадет в  $\sim 1,4$  раза. Поэтому реально можно рассчитывать на точность определения фазовых искажений  $\sim 0,01\lambda$ .

##### 4.1. Тестирование линзы с фокусом $F \cong 39,7 \text{ м}$

На рис. 6 представлена исходная интерферограмма, регистрируемая в эксперименте, а на рис. 7 представлены фазовые искажения, которые вносятся в зондирующий пучок линзой. Там же приведена расчетная зависимость искажения фазы  $\varphi(r)$  линзой, вычисленная по формуле (б):

$$\varphi(r) = 1/\lambda^* (n-1)^* r^2/2R, \quad (6)$$

где  $r$  – расстояние от оси линзы;  $R$  радиус кривизны сферической поверхности линзы;  $n$  – показатель преломления стекла;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения.

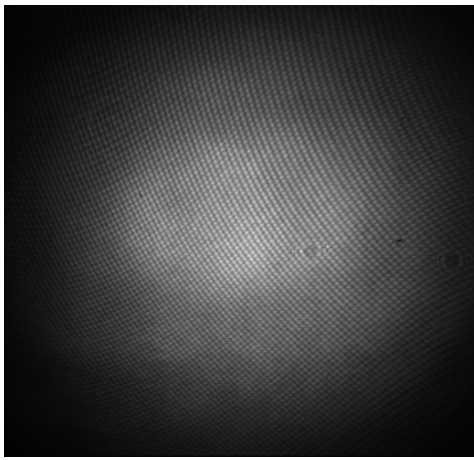
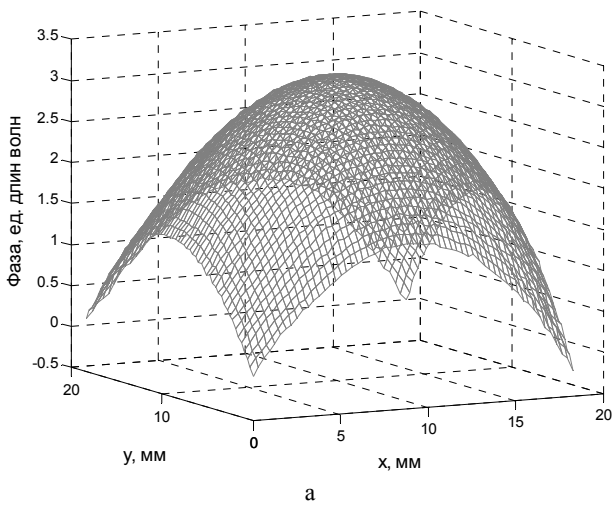
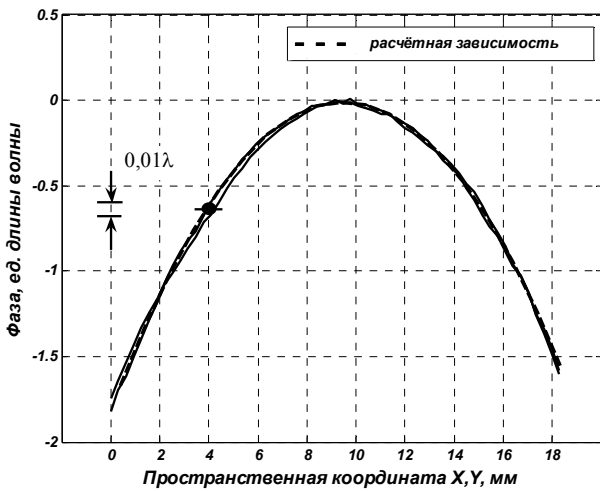


Рис. 6. Фазовые искажения в линзе  $F \cong 39,7$  м. Исходная интерферограмма



а



б

Рис. 7. Фазовые искажения в линзе  $F \cong 39,7$  м. Двумерное изображение (а) и два взаимно перпендикулярных центральных сечения (б)

#### 4.2. Тестирование плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны выпуклой поверхности $R \cong 53,4$ м

На рис. 8 представлены фазовые искажения пучка, прошедшего линзу, в двух взаимно-перпендикулярных диаметральных сечениях.

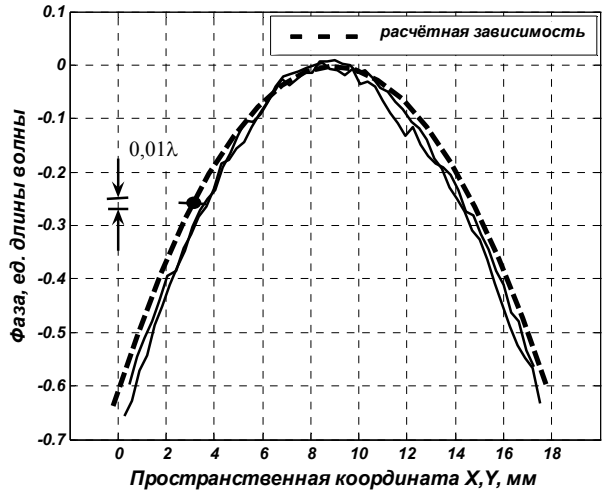
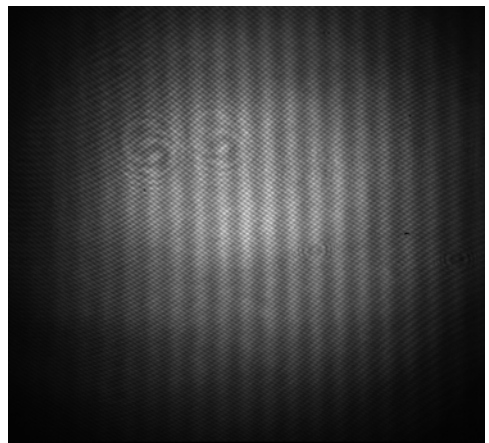


Рис. 8. Фазовые искажения в плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны выпуклой поверхности  $R \cong 53,4$  м. Два взаимно перпендикулярных центральных сечения

#### 4.3. Тестирование оптического клина, $\Theta \cong (2 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад ( $0,66'$ )

На рис. 9 представлены результаты регистрации искажений пучка оптическим элементом с одномерным искажением фазы – клином, в двух взаимно-перпендикулярных сечениях. В интерферометре клин был ориентирован так, что изменение фазы наблюдалось по одному направлению. Угол клина был измерен с помощью автоколлиматора из комплекта оптической скамьи ОСК-2.



а

Рис. 9. Фазовые искажения пучка, прошедшего стеклянный клин с геометрическим углом при вершине  $\Theta \cong (2 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$  рад. Исходная интерферограмма (а). Два взаимно перпендикулярных центральных сечения (б) (см. также с. 206)

## 5. Анализ результатов

Проведено тестирование предлагаемой конструкции интерферометра. Интерферометр позволяет регистрировать двумерные картины фазовых искажений с полем зрения  $18 \times 18 \text{ мм}^2$  и длиной тестируемого пространства 80 см. Применяемый алгоритм обработки позволяет регистрировать фазовые искажения в диапазоне от  $0,01\lambda$  до  $10\lambda$ . По оценкам пространственное разрешение интерферометра составляет 0,5 мм. Как видно из результатов тестирования оптических элементов с известными параметрами, данные, полученные с помощью интерферометра, имеют хорошее согласие с расчетными. Это относится как к элементам с одномерным, так и двумерным искажением фазы.

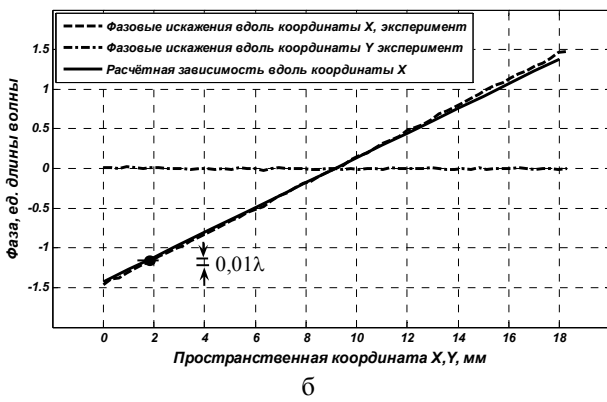


Рис. 9. Окончание

### 4.4. Тестирование оптического клина, $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ рад (2,3')

Этот эксперимент был проделан скорее с целью определения предельных возможностей интерферометра, т. е. определения динамического диапазона регистрируемых фазовых искажений. Дело в том, что в основе алгоритма обработки лежит выделение боковых максимумов Фурье спектра исходных интерферограмм [4]. При этом необходимым условием является пространственное разделение боковых и центрального максимумов Фурье спектра. В конечном итоге это накладывает ограничение на максимальную величину регистрируемых искажений. В экспериментах путем подбора величины угла оптического клина были определены предельные возможности интерферометра с рабочим полем  $18 \times 18 \text{ мм}^2$ . Максимальный угол тестируемого клина составил  $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$  рад (2,3'). На рис. 10 представлены результаты регистрации.

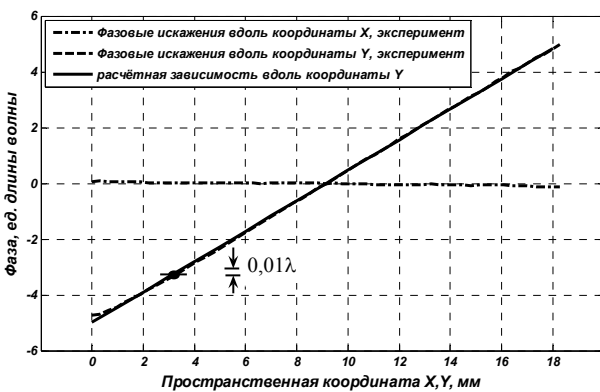


Рис. 10. Фазовые искажения пучка, прошедшего стеклянный клин с геометрическим углом при вершине  $\Theta \cong (7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$  рад. Два взаимно перпендикулярные центральные сечения

## 6. Тестирование качества обработки стержневых активных элементов

### 1-ый образец:

Качество обработки определялось с точки зрения фазовых искажений, возникающих при прохождении зондирующего излучения через активный элемент. Предполагается, что данный активный элемент будет применяться в импульсно-периодическом лазере с диодной накачкой [3]. Фазовые искажения регистрировались с помощью интерференционной методики на стенде, представленном на рис. 1. Поле зрения интерферометра было увеличено до  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ . Фазовые искажения нормировались на единицы длин волн зондирующего излучения ( $\lambda \approx 0,63 \text{ мкм}$ ).

Проведены измерения для случая штатного распространения зондирующего излучения (зигзаг, 8 отражений). Получены следующие фазовые искажения по апертуре активного элемента в центральных взаимноперпендикулярных сечениях (рис. 11).

Из графика видно, что наибольшие искажения возникают в направлении Y и их величина составляет около 5 длин волн. По характеру фазовых искажений активный элемент представляет собой цилиндрическую линзу и по оценкам ее фокусное расстояние составляет около  $15 \div 20 \text{ м}$ .

### 2-ой образец:

Этот образец тестировался следующим образом:

- **На первом этапе** проведены измерения фазовых искажений волнового фронта для случая, когда зондирующее излучение проходило вдоль оптической оси активного элемента без отражений.

- **На втором этапе** проведены измерения фазовых искажений волнового фронта с четырьмя, шестью и восьмью отражениями на проход внутри активного элемента.

Результаты регистраций проделанных на первом этапе представлены на рис. 12.



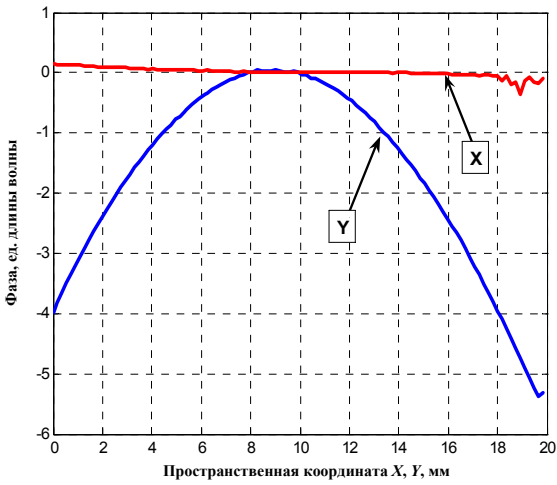
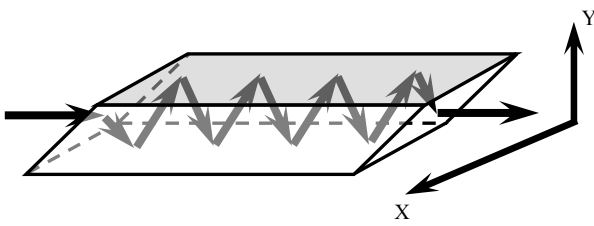


Рис. 11

Как видно из графиков, фазовые искажения возникают в направлении X и составляют  $\approx 0,3\lambda$ . Из этого можно сделать вывод, что торцевые грани активного элемента имеют цилиндрическую форму вдоль оси X с указанной величиной искажений.

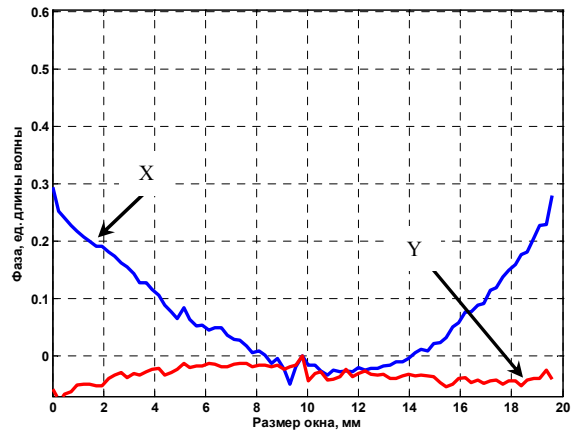
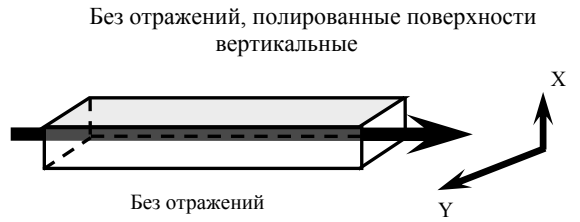


Рис. 12. Фазовые искажения в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях

**На втором этапе** проведены измерения фазовых искажений волнового фронта с 4, 6 и 8 отражениями на проход внутри активного элемента.

Для этих случаев получены следующие фазовые искажения по апертуре активного элемента в центральных взаимноперпендикулярных сечениях (см. рис. 13).

4 отражений на проход

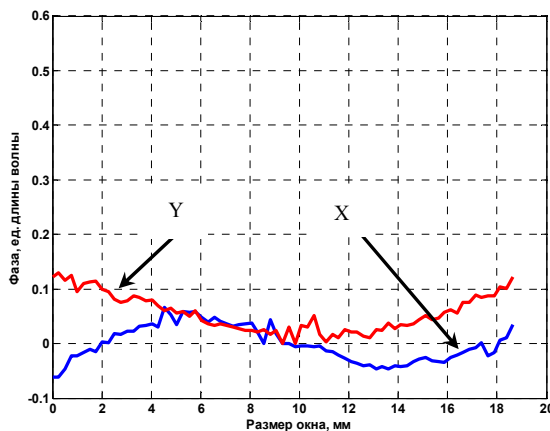
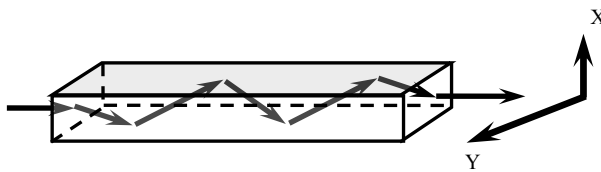
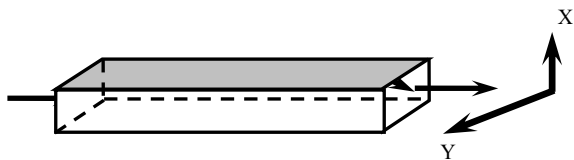


Рис. 13. Фазовые искажения в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях (см. также с. 208)



6 отражений на проход



8 отражений на проход

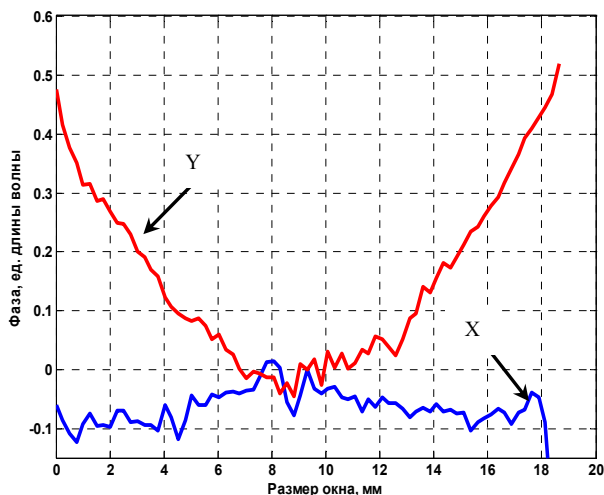
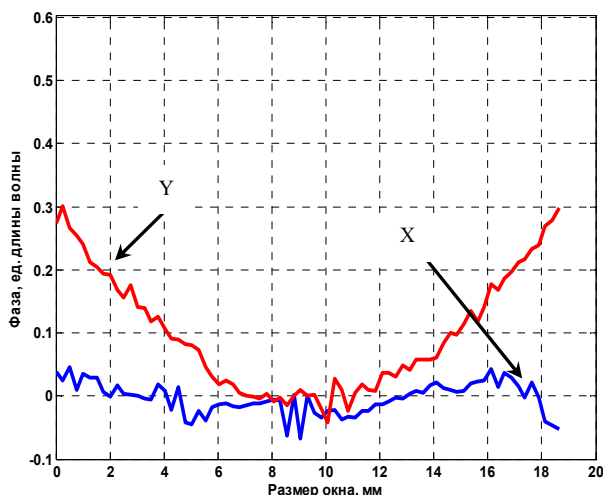
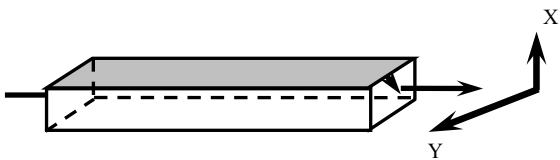


Рис. 13. Окончание

При зигзагообразном распространении излучения по активному элементу, с увеличением количества внутренних отражений фазовые искажения волнового фронта уменьшаются в X-направлении, но начинают возрастать в направлении Y. При максимальном количестве внутренних отражений 8 они достигают величины  $0,5\lambda$ . По-видимому, это связано с тем, что боковые поверхности имеют не идеальную плоскую поверхность, которая при малом количестве отражений приводит к компенсации суммарных искажений волнового фронта, в направлениях X и Y, но затем приводит к увеличению искажений в направлении Y. Как выяснено из экспериментов для данного образца активного элемента оптимальным с точки зрения оптических искажений является вариант распространения пучка с 4-мя отражениями от боковых граней.

## Выводы

По результатам тестирования сделан вывод, что испытанный активный элемент (1-й образец) не соответствует качеству, необходимому для создания многокаскадного лазера, с зигзагообразным распространением излучения по активной среде. Предполагается, что оптическая схема лазера будет состоять из 6–8 последовательных активных элементов. Это, естественно, приведет к недопустимо большой величине расходимости на выходе лазера. Поэтому необходимо совершенствовать технологию финишной обработки активных элементов.

Это было сделано при изготовлении второго образца активного элемента. Здесь величина оптических искажений была уменьшена более чем в десять раз, что сделало возможным его применение в проектируемом лазере.

## Заключение

Представлены результаты работ по созданию интерферометра, позволяющего регистрировать фазовые искажения волнового фронта в прозрачных оптических элементах. Выбранный алгоритм обработки исходных данных и созданное программное обеспечение позволяют регистрировать двумерные фазовые искажения.

Интерферометр с полем зрения  $20 \times 20 \text{ мм}^2$  имеет параметры:

Пространственное разрешение около 0,5 мм.

Чувствительность прибора или ошибка измерений составляет  $\sim 0,01\lambda$ .

Динамический диапазон регистрируемых искажений от  $0,01\lambda$  до  $10\lambda$ .

С помощью оптических элементов с известными параметрами проведено тестирование интерферометра и алгоритма обработки данных. Показано, что данные, полученные с помощью интерферометра, имеют хорошее согласие с расчетными, как при одномерных, так и двумерных искажениях фазы.

Проведено тестирование качества обработки стержневых активных элементов на апертуре  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ .

Для первого образца зафиксирована величина фазовых искажений волнового фронта около  $5\lambda$ , при распространении излучения в штатном режиме зигзага. По характеру фазовых искажений вдоль оси Y активный элемент представляет собой цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием около  $15 \div 20$  м.

Для второго образца максимальная величина искажений волнового фронта наблюдалась для 8 отражений и составила  $\approx 0,5\lambda$ . Для данного образца оптимальным с точки зрения оптического качества является вариант распространения пучка с 4-мя отражениями от боковых граней с величиной искажений волнового фронта  $\approx 0,15\lambda$ .

### Литература

1. Zacharlas A., Bliss E. S. et. al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility, Opt. Eng. 43(12) 2873–2884 (December 2004).

2. Erlanson Al., Fulktrson S., Jancaities K. et. al. Physics Basis for Optical Performance of the NIF Amplifiers, LLNL, UCRL-ID-132680 NIF-0014142, January 11 1999.

3. Твердотельный импульсно-периодический лазер, излучающий цуг импульсов с частотой следования 100 МГц // В. А. Кротов, С. П. Мартыненко, И. И. Соломатин. Отчет о НИР (промежуточный) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», инв. № 13/Т-2241дсп, 2007.

4. Mitsuo Takeda, Hideki Ina\* and Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. J. Opt. Soc. Am. Vol. 72, N 1. January, 1982.

5. Daniel Malacara, Manuel Servin, Zacarias Malacara. Interferogram Analysis for Optical Testing. CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

# ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ОТПАЯННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ КАМЕР С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Д. В. Вялых, А. Е. Дубинов, И. Л. Львов, С. А. Садовой, И. Ю. Корнилова, В. С. Жданов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В импульсных высоковольтных разрядах низкого давления в газоразрядных камерах с полым катодом может происходить полная модуляция разрядного тока на частоте, близкой к ионной плазменной частоте. Это явление можно использовать для генерации мощных высокочастотных (ВЧ-) импульсов.

Статьи [1–3] группы из «Технион» (Израиль) представляют результаты первых разработок и исследований мощных генераторов ВЧ-импульсов на основе газоразрядных камер с полым катодом. Лучшие их результаты, полученные, конечно же, в разных режимах таковы: максимальная длительность ВЧ-импульсов 11,5 мкс, их максимальная мощность 121 кВт, ВЧ-частота 35–39 МГц, частота следования импульсов – до 100 Гц (Xe, при давлении 19–21 мТор).

Статья [4] группы из РФЯЦ-ВНИИЭФ [5] (Россия) представляет широкий обзор исследований, направленных на улучшение характеристик генераторов ВЧ-импульсов с полым катодом и на уточнение физических механизмов их работы. В ней описано целое семейство газоразрядных камер с разными размерами. На одной из них (DC-VIm) при использовании воздуха в качестве рабочей среды были получены следующие результаты (также в разных режимах): максимальная длительность ВЧ-импульсов 1,8 мкс, мощность 8 МВт, ВЧ-частота 100–140 МГц, частота следования импульсов – до 1 кГц.

Одним из факторов, ограничивающих применимость описанных в [1–4] генераторов, является наличие вакуумной системы (форвакуумный баллон и насос) и системы напуска газа и контроля его давления в камере. Применение отпаянных газоразрядных камер позволяет отказаться от использования вакуумной и газовых систем и, следовательно, значительно уменьшить габариты генераторов и обеспечить их портативность. Цель данной работы – создать отпаянные газоразрядные камеры с полым катодом и исследовать их работу в составе мощных генераторов ВЧ-импульсов.

Новые камеры были разработаны в РФЯЦ-ВНИИЭФ и изготовлены в ООО «Импульсные технологии» [6] (Россия). Внешний вид и внутренняя структура камер показана на рис. 1. За основу их геометрии была взята геометрия DC-VIm [4], а в качестве рабочих газов –  $H_2$  или  $N_2$ . Источники соответствующих газов были установлены в заанодной области.

Используемый источник  $H_2$  представляет собой цилиндрический элемент, изготовленный из мелкодисперсного спеченного Ti и снабженный омическим нагревателем (аналогичные источники описаны в [7]).

При нагревании в вакууме выше 800 °C Ti активируется и выделяет  $H_2$ . При остывании ниже 300 °C элемент снова поглощает  $H_2$ , переходя в твердый раствор гидрида титана Ti-H в  $\alpha$ -Ti. Таким образом, титановый источник  $H_2$  является возобновляемым источником.

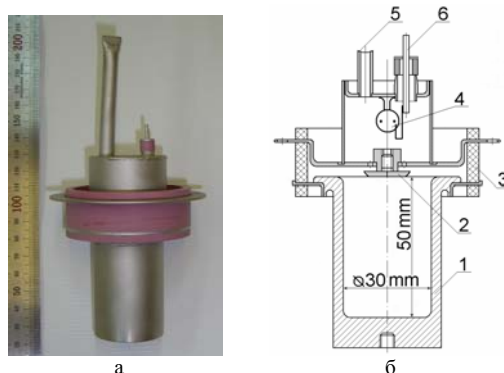


Рис. 1. Отпаянная газоразрядная камера: а) – ее фото (шкала слева – в мм); б) – ее конструкция: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – керамический изолятор; 4 – источник газа; 5 – запаянный патрубок для откачки; 6 – контакт для тока накала для источника газа

Источник  $N_2$  представляет собой элемент, выполненный из полупроводника  $Cu_3N$ . При пропускании через него электрического тока элемент нагревается и при температуре выше 450 °C химически разлагается с выделением  $N_2$ . Фактически, источник  $N_2$  является невозобновляемым источником.

Время подготовки камер к работе после включения нагревателей в обоих случаях составляет не более 5 мин.

Каждая камера включалась в электрическую цепь генератора, содержащую блок зарядки постоянным током, зарядный конденсатор емкостью 0,22 мкФ, активную нагрузку в виде резистора, который был подключен к камере через разделительный конденсатор емкостью 3300 пФ.

Работает генератор следующим образом. После включения блока зарядки напряжение на зарядном конденсаторе растет. В момент достижения напряжения на конденсаторе величины, достаточного для самопробоя и зависящей от давления, в камере развивается разряд с полым катодом. В результате неустойчивости разряда, ток, протекающий по плазме, модулируется. Это приводит к формированию в нагрузке ВЧ-импульса большой мощности. Типичная осциллограмма ВЧ-импульса показана на рис. 2.

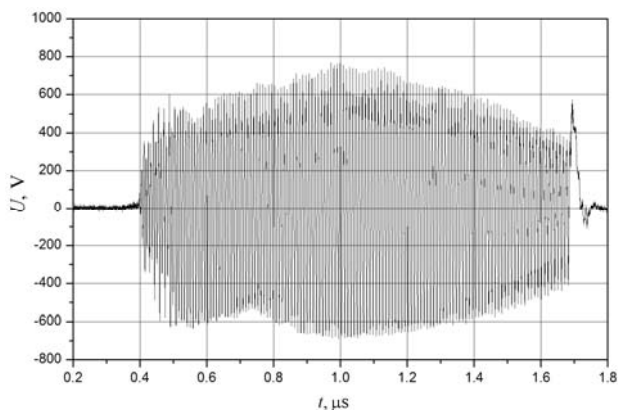


Рис. 2. Пример осциллограммы напряжения на активной нагрузке (получена на нагрузке 3 Ом при использовании газоразрядной камеры, снабженной источником  $N_2$ )

Измерения электротехнических характеристик генератора с камеры, заполненной  $H_2$ , проводились в режиме однократных импульсов. Изменяя ток нагревателя в источнике  $H_2$ , получали различные значения давления газа в камере и, соответственно, различные значения напряжения самопробоя. На рис. 3 представлены характеристики генератора с  $H_2$ . Они похожи на характеристики генераторов с газоразрядными камерами, заполненными воздухом из статьи [4]. Видно, что по мере роста напряжения самопробоя увеличивается выходная действующая мощность, но падает длительность ВЧ-импульса. При этом выходная мощность в  $\sim 3$  раза меньше, чем для воздуха. В [3] показано, что чем массивнее ионы рабочего газа в камере, тем выше эффективность ВЧ-генерации. Настоящие данные также согласуются с этой тенденцией.

Аналогичные характеристики для генератора с  $N_2$  показаны на рис. 4. Они также подтверждают, что тяжелые газы дают большую мощность ВЧ-генерации, чем легкие газы.

В [1] получено, что частота генерации зависит от сорта газа: она уменьшается с ростом массы ионов. Полученные здесь и в [4] данные измерений не подтверждают этот факт: для обеих камер ( $H_2$  и  $N_2$ ), а также для камеры DC-VIm [4], которая была заполнена воздухом, частоты генерации существенно не различались друг от друга и составляли примерно 120 МГц.

С целью определения ресурса камер исследовалась их работа в импульсно-периодическом режиме. Для камеры с  $H_2$  частота следования импульсов устанавливалась величиной 100 Гц. Для работы в этом режиме, с тем, чтобы напряжение самопробоя было 5 кВ, был подобран необходимый ток накала источника  $H_2$ . После  $\sim 1$  ч суммарной работы сериями по 30 с (требовалось примерно 5 мин для воздушного самоохлаждения стенок камеры), т. е. после 120 серий, электротехнические характеристики ВЧ-генератора не изменились. Можно ожидать, что принудительное водяное охлаждение камеры позволит отказаться от 5-минутных перерывов.

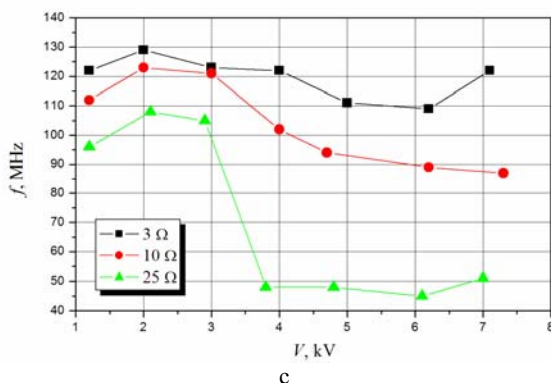
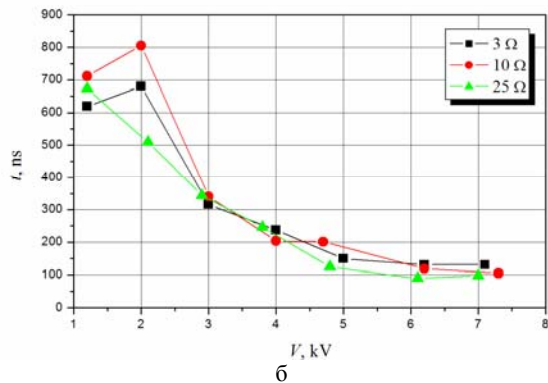
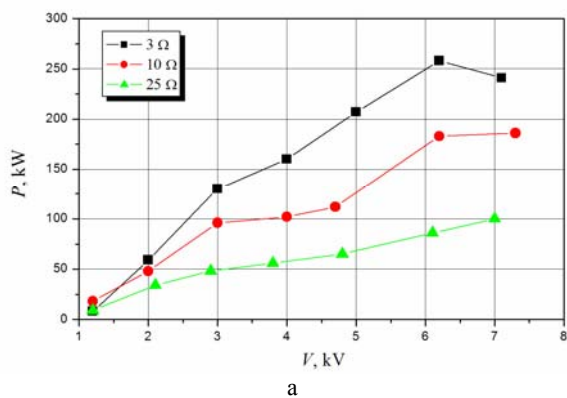


Рис. 3. Характеристики ВЧ-генератора на основе камеры с  $H_2$  (зависимости от напряжения самопробоя): а – действующая ВЧ-мощность на активной нагрузке; б – длительность генерации; в – частота генерации в зависимости для различных значений сопротивления нагрузки

Ресурсные исследования камеры с  $N_2$  также проводились в импульсно-периодическом режиме с частотой 100 Гц при постоянном питании источника  $N_2$ . После суммарных 10 мин работы сериями по 30 с ВЧ-генерация полностью прекратилась, т. к. существенно снизилось напряжение самопробоя (с 5 кВ до 500 В). Для выяснения причины этого снижения камера с  $N_2$  была вскрыта. Разрез был осуществлен перпендикулярно образующей изолятора. Визуальный осмотр позволил выявить эту причину: на внутренней поверхности изолятора появился металлический налет, из-за которого и происходило снижение электропрочности изолятора. В экспериментах с воздухом [4] подобное снижение никогда не наблюда-

лось, при этом некоторые газоразрядные камеры суммарно в импульсно-периодическом режиме (частота до 1 кГц) работали более 1 ч.

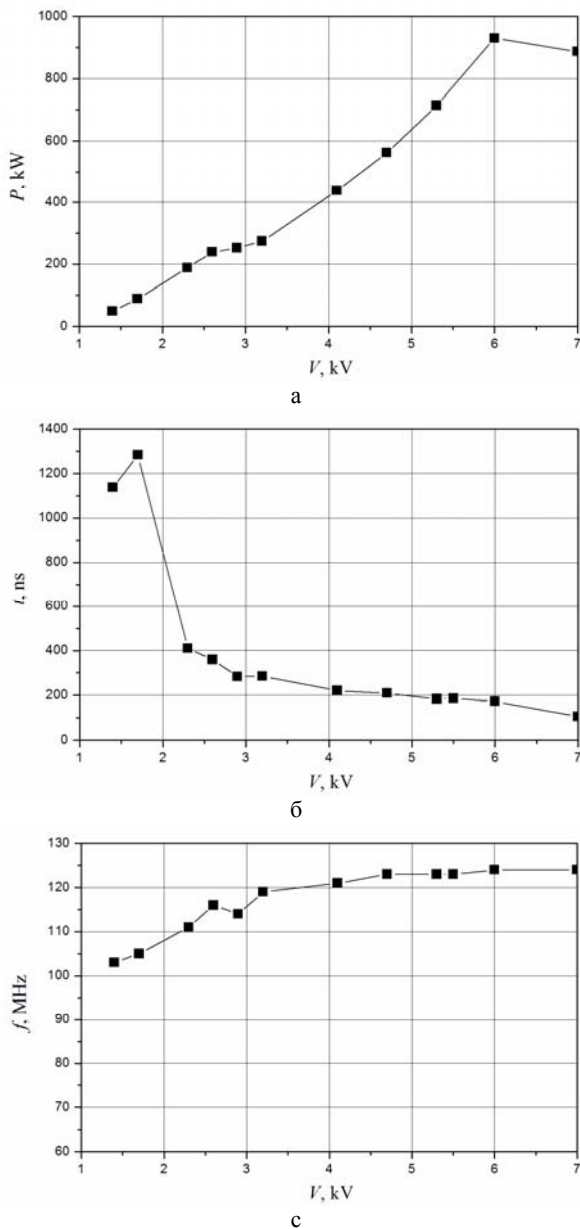


Рис. 4. Характеристики ВЧ-генератора на основе камеры с  $N_2$  (зависимости от напряжения самопробоя): а – действующая ВЧ-мощность на активной нагрузке; б – длительность генерации; с – частота генерации в зависимости при сопротивлении нагрузки величиной 3 Ом

Эту разницу между воздухом и  $N_2$  можно объяснить тем, что в состав воздуха входит  $O_2$ . Металл электродов, распыляемый электрической дугой, окисляется кислородом и покрывает электроды оксидами металлов. В азотной среде металлические капли, распыляемые электродами в дуге, взаимодействует с азотом меньше и оставшаяся металлическая пыль оседает на изоляторе. Исключить этот недостаток камеры с  $N_2$  может позволить защита изолятора с помощью диэлектрической ширмы. Тогда ресурс камеры будет определяться ресурсом источника  $N_2$ .

В итоге, в данной работе показано, что отпаянные газоразрядные камеры, снабженные источниками  $H_2$  и  $N_2$ , могут быть успешно применены в генераторах мощных ВЧ-импульсов с импульсно-периодическим режимом работы. Подобные генераторы представляются более эффективными и технологичными, они обладает меньшими энергозатратами, размерами и массой, чем аналогичные по параметрам вакуумные генераторы на основе электронных пучков.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 10-02-00137.

## Литература

1. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J., Rosenberg A., Slutsker Ya. Z. Phys. Rev. Lett. 71, 2919 (1993).
2. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J., Rosenberg A., Slutsker Ya. Z. Appl. Phys. Lett. 66, 1193 (1995).
3. Bliokh Yu. P., Felsteiner J., Slutsker Ya. Z., Vaisberg P. M. IEEE Trans. Plasma Sci. 29, 895 (2001).
4. Bulychev S. V., Vyalykh D. V., Dubinov A. E., Zhdanov V. S., Kornilova I. Yu., L'vov I. L., Saikov S. K., Sadovoy S. A., Selemir V. D. Plasma Phys. Rep. 35, 941 (2009).
5. РФЯЦ-ВНИИЭФ, [www.vniief.ru](http://www.vniief.ru).
6. ООО «Импульсные технологии», [www.pulsetech.ru](http://www.pulsetech.ru).
7. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л. Н., Вагин Л. Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Сов. Радио, 1974.

# ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ЖИДКОСТЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*А. Б. Георгиевская, В. А. Раевский*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Процессы динамического диспергирования жидкостей и твердых веществ под действием ударных волн представляют большой интерес с точки зрения влияния на параметры работы различных газодинамических устройств, использующих энергию взрыва. Особый интерес представляет образование и распределение мелких фракций по размерам в зависимости от параметров течения и реологических свойств среды.

Одним из механизмов ударно-волнового диспергирования материалов является выброс частиц со свободной поверхности после выхода на нее ударной волны. В данном случае выход ударной волны (УВ) на свободную поверхность вещества можно рассматривать как частный случай неустойчивости Рихтмайера–Мешкова [1–5], когда в одной из контактирующих сред плотность и давление близки к нулю ( $\rho \rightarrow 0, P_0 \rightarrow 0$ ). При определенном характере возмущений на поверхности развитие неустойчивости приобретает кумулятивный характер [6–8], что в дальнейшем, в зависимости от соотношения определяющих параметров (прочность, интенсивность ударной волны, начальные возмущения), может привести к распаду кумулятивных струй на отдельные фрагменты (пыление). Во многих случаях начальными возмущениями является шероховатость, полученная при токарной обработке. Типичный масштаб таких возмущений характеризуется длиной волны (периодичность)  $\lambda = 50 \div 500$  мкм и амплитудой возмущений  $a_0 = 10 \div 200$  мкм ( $Rz20 \div 80$ ). В этом случае выбрасываемые струи и частицы имеют малый размер ( $\ll 1$  мм) и пыление носит микрокумулятивный характер [9–12]. Исследование процесса выброса вещества со свободной поверхности под действием ударной волны проводится достаточно давно [9–18]. Однако, экспериментальные и расчетные исследования спектральных характеристик потока частиц, пока далеки от завершения.

При достаточной интенсивности УВ металл может оказаться в расплавленном состоянии. В этом случае размер фрагментов, на которые распадается струя, определяется величиной поверхностного натяжения и вязкости, а также скоростью деформации.

Другой механизм дробления жидкости и образования отдельных частиц связан с градиентом скорости разгрузки вещества после выхода ударной волны спадающего профиля. В этом случае за счет градиента скорости разлета жидкости начинается ее откольное

разрушение, а затем дробление откольных слоев на более мелкие частицы. Откольное разрушение жидкостей по сравнению с аналогичными процессами в твердых телах имеет ряд особенностей. В частности, образование в жидкостях откольных слоев пенной структуры [20, 21]. Конечная стадия – формирование крупномасштабных разрывов в жидкости и переход от откольных слоев к каплям, образующимся за счет флуктуаций течения, до последнего времени исследованы не достаточно.

В данной работе приведены результаты расчетно-теоретических исследований механизмов диспергирования жидкостей под воздействием ударной волны. Рассматривались два случая:

– разрушение вещества в результате возникновения волн растяжения после выхода на свободную поверхность волны Тейлора;

– разрушение вещества в результате развития неустойчивости на свободной поверхности после выхода ударной волны.

## 1. Оценка средних размеров частиц при диспергировании вещества

Распад вещества на фрагменты происходит в результате деформирования и образования растягивающих напряжений. При этом на образование новой поверхности затрачивается определенная энергия.

При дроблении материала в любом фрагменте происходит внутреннее движение вещества относительно его центра масс. Предполагая, что дробление частиц становится невозможным, когда внутреннее давление сравнивается с напряжением, связанным с поверхностным натяжением и прочностными свойствами вещества получено уравнение для фрагмента минимального размера.

$$\rho \frac{\dot{\varepsilon}_T^2 \bar{R}^2}{2} = \alpha (\dot{\varepsilon}_T \mu + Y_S) \varepsilon_p + \beta \frac{2\sigma}{R}. \quad (1)$$

В этом выражении  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\mu$  – коэффициент вязкости,  $Y_S$  – стационарный предел текучести вещества,  $\varepsilon_p$  – деформация, при которой начинается разрушение,  $\alpha, \beta$  – безразмерные константы.



Уравнение (1) было получено для пластических веществ. К материалам, для которых характерно хрупкое разрушение, оно не применимо.

При  $Y_S = 0$ ,  $\varepsilon_p = 1$  (1) переходит в уравнение, характерное для вязкой жидкости

$$\rho \frac{\dot{\varepsilon}_i^2 \bar{R}^2}{2} = \alpha \dot{\varepsilon}_i \mu + \beta \frac{2\sigma}{\bar{R}}. \quad (2)$$

Если можно пренебречь поверхностным натяжением (по сравнению с вязкостью), то

$$\bar{R} \approx \left( \frac{2\alpha\mu}{\rho\dot{\varepsilon}_i} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

В случае, когда влиянием вязкости можно пренебречь, размер фрагментов будет определяться выражением

$$\bar{R} \approx \left( \frac{4\beta\sigma}{\rho\dot{\varepsilon}_i^2} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

Разумеется, для того, чтобы пользоваться уравнением (1) для практических расчетов необходимо хорошо знать реологические свойства материала  $\mu(T, \dot{\varepsilon}_i)$ ,  $Y(T, \dot{\varepsilon}_i)$ ,  $\varepsilon_p(T, \dot{\varepsilon}_i)$ ,  $\sigma(T, \dot{\varepsilon}_i)$ . Кроме того, необходимо на основании серии тестовых экспериментов уточнить параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ .

### 1.1. Фрагментация жидкости в результате действия волны растяжения

Рассмотрим случай нагружения жидкости ударной волной со спадающим профилем без заданных на свободной поверхности начальных возмущений. После выхода волны Тейлора на свободную поверхность жидкого слоя возникает волна разгрузки, вызывающая растягивающие напряжения. Их действие приводит к распаду жидкости на откольные слои, толщина которых определяется  $\sigma_p$ . Жидкость в одностороннем приближении разлетится на множество мелких слоев, каждый из которых движется с постоянной скоростью  $U_i$ . Поскольку в таком случаи скорость деформации постоянна, то и распределение частиц вблизи свободной поверхности ожидается постоянным [17].

На рис. 1 приведены зависимости среднего радиуса капель воды, рассчитанных по формулам (2) – (4). Здесь вязкость воды  $\mu$  принималась равной  $1 \cdot 10^{-3}$  Па·с при  $T = 20$  °С,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, поверхностное натяжение  $\sigma = 72,88$  мН/м при  $T = 20$  °С [24].

Из графика видно, что для воды скорость деформации, меньше которой вязкость не оказывает влияния на размер фрагментов, составляет величину  $\dot{\varepsilon}_{кр} \sim 10^{10}$  1/с.

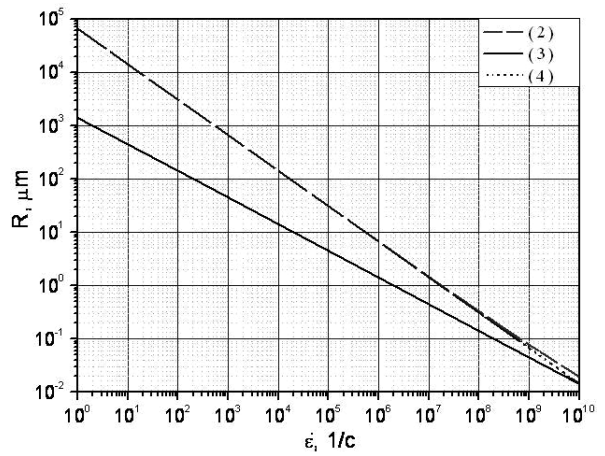


Рис. 1. Зависимость среднего радиуса капель воды от скорости деформации

На основании второго закона Ньютона время, затрачиваемое на формирование таких фрагментов, оценивается:

$$t \approx \sqrt{\frac{2\rho d^3}{\sigma_n}}, \quad (5)$$

где  $d$  — толщина откольной пластины.

В реальном случае время распада может быть существенно меньше из-за флуктуаций скорости жидкости.

Предполагая, что на конечной стадии образовавшиеся частицы не взаимодействуют друг с другом, давление в области разлета равно 0 и влияние окружающего воздуха мало (плотность воды на 3 порядка больше плотности воздуха) можно оценить изменение средней плотности частиц в раздробленной области от времени

$$\bar{n}(t) = \frac{\bar{\rho}}{\frac{4}{3}\pi\rho_0\bar{R}^3} = \frac{3}{16} \frac{\rho_0\dot{\varepsilon}_{i0}^2}{\pi\sigma(1+\dot{\varepsilon}_{i0}t)}, \quad (6)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{i0}$  — начальная скорость деформации, определяющая размер капель после дробления, в соответствии с (2).

Величина  $\dot{\varepsilon}_{i0}$  может быть взята из численных расчетов.

Однако, приведенные выше формулы служат лишь для оценки средних величин фрагментов дробления. В силу стохастичности процесса существует распределение частиц по размерам, которое будет определяться распределением относительно данного среднего размера  $\bar{R}$ .

Как показано в работах [23], [26], [27] в большинстве экспериментов по диспергированию жидкостей, распределение капель по размерам описывается распределением Розина – Раммлера

$$W_+(R) = \exp\left[-\left(\frac{R}{\bar{R}}\right)^n\right], \quad (7)$$

где  $W_+(R)$  — вероятность обнаружить фрагмент с размером больше  $R$ .



Теория перколяции [23] в двумерной постановке дает показатель  $n = 3$ . По некоторым источникам показатель  $n = 1 \div 4$  [26]. Тем самым вопрос о величине показателя  $n$  остается открытым.

Предполагается, что распределение частиц по размерам в данной задаче также опишется распределением Розина – Раммлера с некоторым показателем  $n$ .

## 1.2. Уравнения, определяющие рост возмущений на свободной поверхности и диспергирование вещества

Предположим, что ударная волна выходит на свободную поверхность металла и приводит к его плавлению после разгрузки. На поверхности, всегда содержащей возмущения, развивается неустойчивость, в последствии приводящая к неограниченному росту возмущения на ней [5]. В области углублений скорость движения оказывается выше, чем средняя скорость разгрузки. При этом возможно образование микроструй, которые в последствии могут разрушаться на отдельные фрагменты. В данном случае формирование спектра частиц, выбрасываемых с поверхности во многом определяется тем, что скорость деформации изменяется с глубиной.

Рассмотрим поверхность жидкости с синусоидальными начальными возмущениями

$$a_0(x) = a_0 \cos(kx). \quad (8)$$

Схематично процесс выброса вещества после выхода ударной волны на свободную поверхность показан на рис. 2.

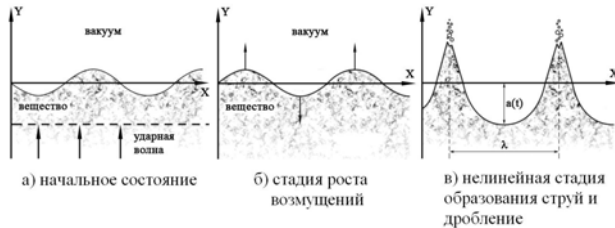


Рис. 2. Выброс частиц под действием ударной волны

В случае, когда можно пренебречь сжимаемостью, развитие возмущений после выхода ударной волны описывается уравнениями [5]

$$u_y(x, y, t) = a_0 \cos(kx) e^{ky} (1 - ku_0 t); \quad (9)$$

$$u_x(x, y, t) = -a_0 \sin(kx) e^{ky} (1 - ku_0 t),$$

а скорость движения вещества уравнениями

$$\dot{u}_y = -a_0 k u_0 \cos(kx) e^{ky}; \quad (10)$$

$$\dot{u}_x = a_0 k u_0 \sin(kx) e^{ky},$$

где  $u_0$  – скорость поверхности после разгрузки;  $u_x, u_y$  – смещение вещества в направлениях  $y$  и  $x$ .

Эти уравнения справедливы, когда возмущения малы ( $a_0/\lambda \ll 1$ ).

Используя уравнения (10) можно приближенно оценить скорость деформации вещества в начальный момент роста возмущений

$$\dot{\varepsilon}_i(y) = \dot{\varepsilon}_m e^{ky}, \quad (11)$$

где  $\dot{\varepsilon}_m = \frac{2}{\sqrt{3}} a_0 k^2 u_0$  – максимальная скорость деформации.

Как следует из (11), скорость деформации жидкости зависит от относительной амплитуды возмущений  $a_0/\lambda$ , от длины волны, а также от глубины данной точки жидкости.

В большинстве практических случаев ведущую роль в формировании частиц играет поверхностное натяжение. В этом случае из (4), (11) следует зависимость средних радиусов частиц от глубины расположения данного слоя

$$\bar{R} = \bar{R}_m e^{-\frac{2}{3}ky}, \quad (12)$$

где  $\bar{R}_m$  – минимальный средний радиус капель, реализующийся на поверхности вещества.

Масса выбрасываемых частиц пропорциональна площади поверхности и толщине слоя [17]. Учитывая (12), а также, что при синусоидальном начальном возмущении выбрасывается примерно половина вещества, получаем интегральное распределение массы частиц по радиусам

$$m_S(\bar{R}) = \frac{3\rho}{4k} \ln \frac{\bar{R}}{\bar{R}_m}, \quad (13)$$

где  $m_S$  – масса частиц, имеющих средний радиус в диапазоне  $\bar{R}_m < R < \bar{R}$ , выбрасываемых с единицы площади поверхности ( $dm/dS$ ).

Плотность вероятности распределения средних радиусов частиц, связанного с изменением скорости деформации определяется уравнением

$$\frac{dW}{d\bar{R}} = \frac{3\bar{R}_m^3}{\bar{R}^4}, \quad (\bar{R} > \bar{R}_m). \quad (14)$$

Соответственно интегральные распределения имеют вид

$$W_+(R > \bar{R}) = \left( \frac{\bar{R}_m}{\bar{R}} \right)^3, \quad (\bar{R} > \bar{R}_m). \quad (15)$$

Распределения частиц по размерам, учитывающие распределение относительно среднего радиуса  $\bar{R}$ , получается интегрированием уравнения (15) совместно с уравнением Розина – Раммлера

$$\frac{dW}{dr} = \frac{3n}{r^4} \int_0^r t^{n+2} \exp(-t^n) dt. \quad (16)$$

Распределение (16) с показателями  $n = 2 \div 4$  показано на рис. 3. Там же приведены распределения среднего радиуса (14).

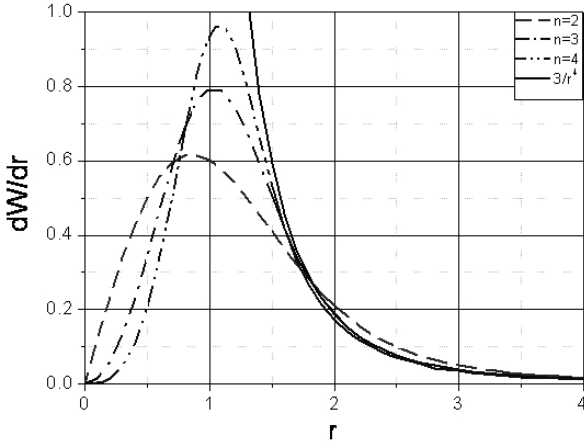


Рис. 3. Распределение выброса частиц по размерам при различных  $n$

$$W_-(r < \bar{r}) = \int_r^\infty \left[ \frac{3n}{r^4} \int_0^r t^{n+2} \exp(-t^n) dt \right] dr, \quad (17)$$

где  $t = R/\bar{R}$ .

Как видно из графиков  $\bar{R}_m$  близок к наиболее вероятному значению радиуса частицы. При  $r > 1,75$  ( $\bar{R} \geq 1,75\bar{R}_m$ ) распределение (16) переходит в зависимость (14).

При  $n = 3$ , выражения (16), (17) упрощаются:

$$W_+(r > \bar{r}) = \frac{1 - \exp(-r^3)}{r^3}. \quad (18)$$

Зависимость  $W_+(r)$  по (18) и (15) показана на рис. 4. Там же приведено распределение с  $n = 2$  (пунктирная линия).

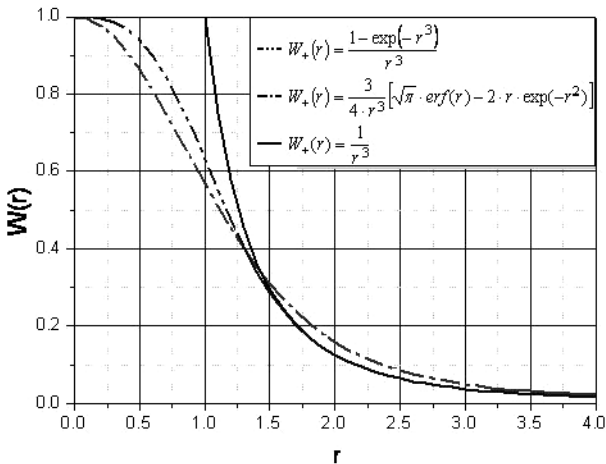


Рис. 4. Интегральное распределение выбрасываемых частиц по размерам

Согласно экспериментальным исследованиям пыления с поверхности металлов под действием ударных волн [19], распределение имеет вид  $W_+ \sim 1/\bar{R}^k$ , где  $k$  изменяется в зависимости от постановки эксперимента в пределах от 2,8 до 5,6. Расчетные зависимости  $W_+$  (15), (17) соответствуют экспериментально измеренным спектрам, за исключением диапазона малых частиц  $\bar{R} \leq \bar{R}_m$ , которые, по-видимому, весьма сложно зарегистрировать экспериментально.

Распределение выбрасываемой массы по размерам частиц:

$$\begin{aligned} \frac{dm_S}{dR} &= \rho \frac{4}{3} \pi \bar{R}^3 N_S \frac{dW}{dR} = \\ &= \frac{3\rho}{4k} \frac{1}{R} \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R}{R_m} \right)^3 \right] \exp\left( -\frac{R}{R_m} \right)^3 \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Интегральное распределение

$$\begin{aligned} m_S \left( r < \frac{R_{\max}}{R_m} \right) &= \\ &= \frac{3\rho}{4k} \int_0^{R_{\max}/\bar{R}_m} \frac{1}{r} \left( 1 - \left( 1 + r^3 \right) e^{-r^3} \right) dr. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{Функция } f(r_{\max}) = \int_0^{r_{\max}} \frac{1}{r} \left( 1 - \left( 1 + r^3 \right) e^{-r^3} \right) dr$$

приведена на рис. 5.

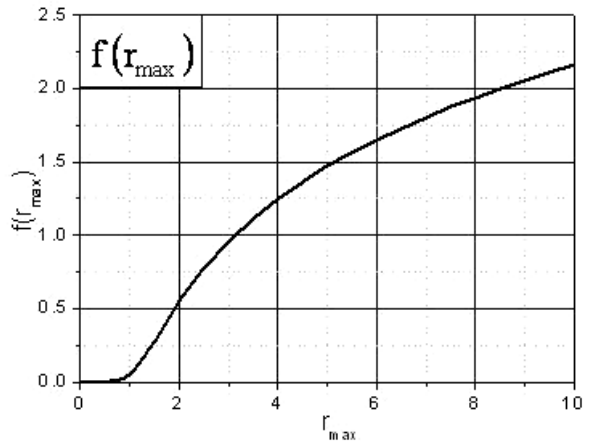


Рис. 5. График функции  $f(r_{\max}) = \int_0^{r_{\max}} \frac{1}{r} \left( 1 - \left( 1 + r^3 \right) e^{-r^3} \right) dr$

При  $R_{\max} \geq 2\bar{R}_m$  уравнение (20) мало отличается от (13).

Из (13), (20) следует, что выбрасываемая масса бесконечна. На самом деле скорость потока частиц быстро уменьшается. Это следует из начального распределения скорости (10).

## 2. Сравнение полученных решений с результатами экспериментов

В работе [22] проведены измерения спектра частиц свинца после выхода УВ на свободную поверхность.

Согласно проведенным расчетам интенсивность УВ, выходящей на свободную поверхность, составляла  $P \approx 24$  ГПа, соответствующая температура свинца после разгрузки составляла  $T_k = 520$  °К, что ниже температуры плавления свинца  $T_{пл} = 600$  °К. Скорость свободной поверхности свинца, определенная согласно расчетам, составила 1,37 км/с. На свободной поверхности свинца были заданы периодические 2D возмущения с длиной волны  $\lambda = 300$  мкм, амплитудой  $a_0 = 40$  мкм (шероховатость Rz80),  $\lambda = 290$  мкм, амплитудой  $a_0 = 10$  мкм (шероховатость Rz20). С помощью оптической методики регистрировался размер частиц, выбрасываемых со свободной поверхности свинца. Профиль поверхности образцов измерялся с помощью профилографа «Абрис ПМ-7».

Согласно (1) получаем зависимость среднего диаметра от скорости деформации для свинца (рис. 6, пунктирная линия). Там же приведена зависимость без прочности (2).

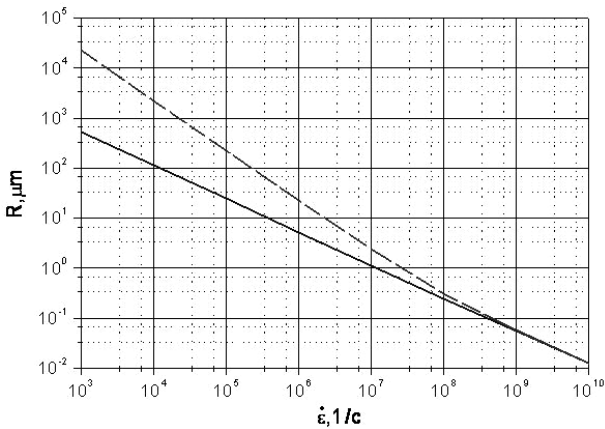


Рис. 6. Зависимость среднего радиуса частиц от скорости деформации

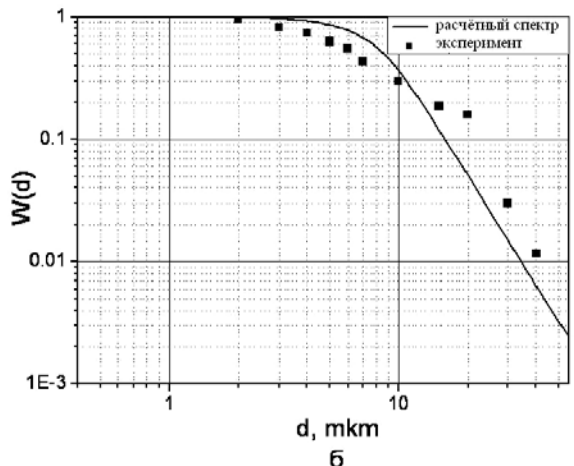
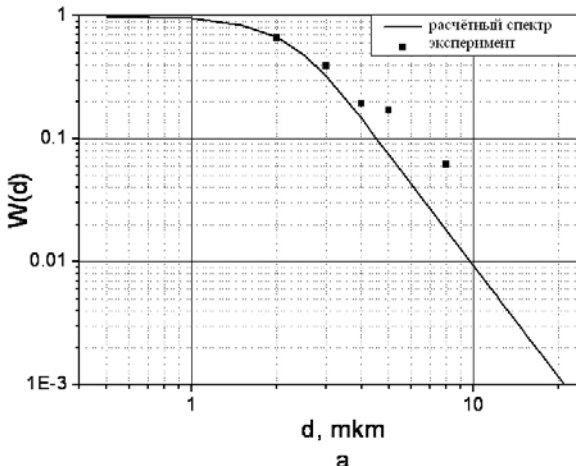


Рис. 8. Сравнение результатов экспериментов с аналитическим распределением для свинца при  $P = 24$  ГПа

На рис. 6 видно, что при скоростях деформации  $< 10^7$  1/с прочность оказывает влияние на размер частиц.

На рис. 7 представлен видеокادر одного из опытов.

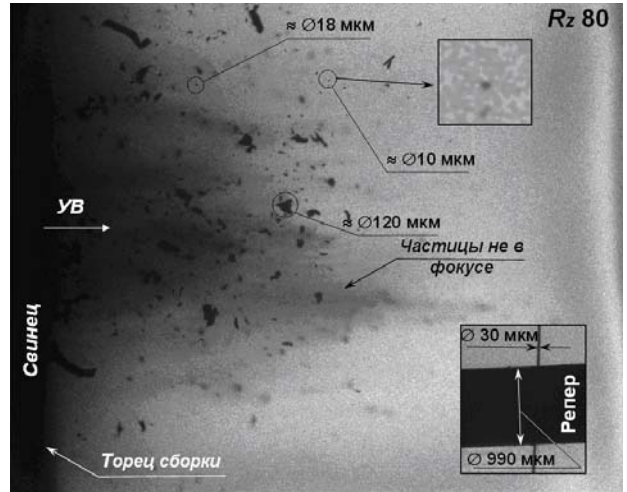


Рис. 7. Видеокادر опыта: шероховатость Rz80

Скорость деформации при шероховатости Rz80 составила  $\dot{\epsilon}_m = 2,7 \cdot 10^7$  1/с. Полагая, что константы  $\alpha, \beta$  равны 1 и  $\epsilon_p = 0,7$  до начала дробления,  $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\sigma = 0,4$  Н/м и  $Y = 4$  МПа при  $T = 520$  К [24], средний размер частиц, согласно модели, равен  $\bar{d} = 2,1$  мкм. Средний размер, зафиксированный в эксперименте, 3,8 мкм. Скорость деформации при шероховатости Rz20 составила  $\dot{\epsilon}_m = 7,4 \cdot 10^6$  1/с. Средний размер частиц при шероховатости Rz20 по расчету составляет  $\bar{d} = 8,2$  мкм. Средний размер, зафиксированный в эксперименте, 12 мкм. Сравнение экспериментально полученного распределения с построенной моделью представлено на рис. 8 а, б.

В [22] приводятся результаты экспериментов пыления поверхности свинца с шероховатостью Rz80 ( $\lambda = 300$  мкм,  $a_0 = 40$  мкм) при нагружении ее ударной волной интенсивностью  $P = 15$  ГПа. Согласно результатам численного моделирования [24] скорость СП составляла  $0,95$  км/с, а температура образца  $T \approx 425$  К. Скорость деформации составила  $\dot{\varepsilon}_m = 1,9 \cdot 10^7$  1/с, скорость частиц по (10)  $V_q = 1,7$  км/с, что соответствует экспериментально зарегистрированным скоростям. Расчетный средний размер частиц равен  $\bar{d} = 4,5$  мкм, а по экспериментальным данным –  $\bar{d} = 32$  мкм.

В работе [22] также приводится распределение по размеру частиц для меди с шероховатостью Rz20. Давление на фронте ударной волны по расчету [25] составляло  $P = 23$  ГПа, скорость свободной поверх-

ности меди  $1,1$  км/с. Оценки по (1) показывают, что при скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_m = 5,9 \cdot 10^6$  1/с средний размер частиц  $\bar{d} = 13$  мкм. Согласно эксперименту эта величина составляет  $16$  мкм. При оценке прочности использовалась модель РИНГ с параметрами для меди [29].

При нагружении поверхности давлением  $P = 23$  ГПа прочность меди  $Y = 0,2$  ГПа. Для недеформированной меди  $\varepsilon_p = 0,06$  [24]. При таком высоком пределе текучести размер фрагментов, на которые распадется струя, будет определяться только прочностными свойствами вещества.

На рис. 9 а, б представлено сравнение экспериментально полученного спектра с аналитическим распределением для свинца и меди соответственно, полученным по формуле (1), (18).

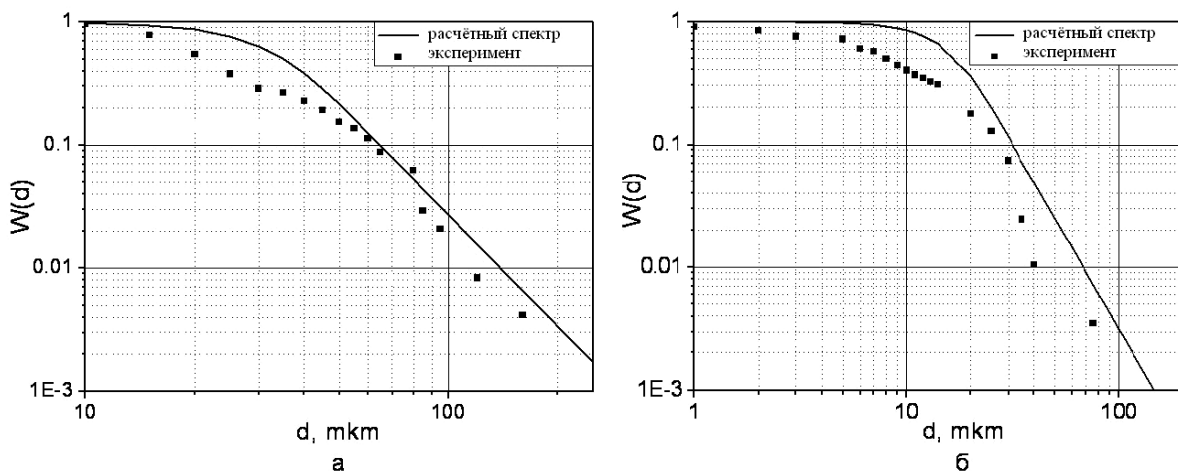


Рис. 9. Сравнение результатов экспериментов с аналитическим распределением для свинца и меди (18)

Из графиков следует, что экспериментальные данные качественно согласуются с аналитической кривой. Завышенный средний радиус фрагментов и расхождение аналитической кривой с экспериментом в области малых фракций, по-видимому, связан с тем, что в эксперименте не фиксируются частицы размером меньше  $2$  мкм. Кроме того, лучшее согласие с экспериментом может быть достигнуто при соответствующем выборе констант  $\alpha$ ,  $\beta$ . Для этого требуется значительный объем надежных экспериментальных данных. В частности необходимы дополнительные исследования по определению вязкости, поверхностной энергии и прочности металлов.

## Заключение

На основании общефизических представлений получены приближенные уравнения для оценки спектральных характеристик жидких частиц, выбрасываемых с поверхности вещества под действие ударной волны, а также предпринята попытка применения этих уравнений к твердым веществам с учетом их прочностных свойств.

В случае жидких металлов поверхностное натяжение играет существенно большую роль, чем вязкость. Для подтверждения этого предположения необходимо провести серию экспериментов с жидкостями с известным поверхностным натяжением в отсутствие начальных возмущений на поверхности ( $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ ). В последующих экспериментах возможно исследование влияния вязкости, поверхностного натяжения, начальных возмущений на спектральные характеристики частиц.

Проведены эксперименты на свинце при интенсивностях УВ  $15$  и  $24$  ГПа и меди при интенсивности УВ  $23$  ГПа. В случае, когда свинец находился вблизи плавления при  $P_{\text{вых}} = 24$  ГПа размер частиц определялся как прочностью, так и поверхностным натяжением. Анализ экспериментальных данных по меди показывает, что размер частиц определяется только прочностными свойствами вещества.

Расчетный анализ, использующий полученные в данной работе соотношения, позволил на качественном уровне описать полученные в экспериментах распределения частиц по размерам.

Однако, представленные в данной работе уравнения и оценки получены с использованием ряда

упрощающих предположений и требуют уточнения на основе экспериментов и численных расчетов, кроме того необходимы дополнительные исследования прочностных свойств металлов, вязкости как в жидкой, так и в твердой фазе.

## Литература

1. Бахрах С. М., Ковалев Н. П. Неустойчивость Тейлора в упругопластических средах. Численные методы механики сплошной среды. 1980. Т. 2, № 2, С. 5–21.

2. Мешков Е. Е. Исследование гидродинамических неустойчивостей в лабораторных условиях. Саров, 2006.

3. Лебедев А. И., Игонин В. В., Низовцев П. Н., Раевский В. А. Исследование неустойчивости свободной поверхности твердых тел при ударно-волновом воздействии // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. Вып. 1. С. 590–597.

4. Germann T. C., Hammerberg J. E., Dimonte G. Billion-atom simulation of shock-induced particulate ejection and Richtmyer-Meshkov instability development in copper. New models of hydrocodes for shock wave processes in condensed matter. 7<sup>th</sup> Bilnual International Conference. Portugal. 18–23 May, 2008.

5. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Com. Pure and Appl. Math.* 1960. Vol. 13. P. 297–319.

6. Низовцев П. К., Раевский В. А., Соловьев В. П. Неустойчивость свободной поверхности твердого вещества // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1998, № 2. С. 81–82.

7. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Романов А. В. и др. Моделирование струйных течений при выходе ударной волны на свободную поверхность // ПМТФ. 2006. Т. 48, № 1. С. 16–23.

8. Георгиевская А. Б. Расчетно-теоретическое исследование развития возмущений на свободной поверхности твердого вещества при выходе на нее ударной волны // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 382–389.

9. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах их диагностики // Физика горения и взрыва, 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.

10. Огородников В. А., Иванов А. Г., Крюков Н. И. и др. Ударно-волновое диспергирование конструкционных материалов // ФГВ. 1999, №5. С. 122.

11. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Хохлов Н. П. и др. Взрывное разрушение, фрагментация и диспергирование конструкционных материалов // Химическая физика. 2001. Т. 20, № 8. С. 73.

12. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. Вып. 3 (9). С. 1–9.

13. Asay J. R. Material ejection from shock loaded free surfaces of aluminum and lead. Sandia Laboratories Report. Sand 76-0542, 1976.

14. Asay J. R. Effect of shock wave rise time on material ejection from aluminum surfaces. Sandia Laboratories Report. Sand 77-0731, 1971.

15. Dunning M. J., Jacoby B. Ejecta production from shocked metal samples. The Forth Zababakhin Scientific Talks. 1955.

16. Soulard L. Molecular Dynamics Study of the Micro-Spallation. International conference XI Khariton's topical scientific readings. 2009.

17. Раевский В. А., Георгиевская А. Б. Оценка спектральных характеристик частиц, выбрасываемых со свободной поверхности жидкости под действием ударной волны // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 514–521.

18. Sharp D. H. An overview of Raylie-Taylor instability. *Physic.* 1984. 12D. P. 3–18.

19. Germann T. C., Hammerberg J. E. In APS Shock Compression of Condensed Matter-2003.

20. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000.

21. Дремин А. Н., Канель Г. И., Колдунов С. А. Исследование откола в воде, этиловом спирте и плексиглазе.

22. Невмержицкий Н. В., Огородников В. А., Давыдов И. А. и др. Исследование выброса частиц со свободной поверхности свинца при выходе на нее ударной волны // Доклад на 21 газодинамическое совещание ВНИИЭФ, ВНИИТФ. Россия: Саров, 25–30 мая, 2009.

23. Султанов Ф. М., Ярин А. Л. Перколяционная модель процесса диспергирования капель по размерам // ПТМФ. 1999, № 5. С. 48–54.

24. Физические величины: Справочник. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991. 1232.

25. Минеев В. Н., Фунтиков А. И. Измерения вязкости воды при ударно-волновом сжатии // ТВТ. 2005. Т. 43, №1. С. 136–145.

26. Лышевский А. С. Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления. Новочеркасск: Новочерк. политехн. ин-т, 1961.

27. Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А. и др. Диспергирование капли жидкости под действием воздушной ударной волны интенсивностью от 0,2 до 42 атм // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 598–605.

28. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1992.

29. Игнатова О. Н., Каганова И. И., Подурец А. М. и др. Механические свойства меди М1 после предварительного ударного нагружения в широком диапазоне скоростей деформирования // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 287–293.

# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА БИООБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НЕТЕПЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

А. В. Голубев, И. А. Синельникова, Е. П. Лобкаева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Для исследования функциональной активности головного мозга биообъектов разного уровня системной организации и ее изменений при воздействии внешних факторов используются методы сверхпроводящей магнитоэнцефалографии (МЭГ) (СКВИД-магнитометрии) [1, 2] и электроэнцефалографии (ЭЭГ) [3, 4].

Исследования электромагнитной активности головного мозга биообъектов с помощью этих двух методов позволяют не только получать необходимую диагностическую информацию об изменении функциональной активности головного мозга биообъектов при проведении экспериментальных исследований, но и выявить преимущества каждого метода при использовании в тех или иных экспериментальных условиях.

## Широко известны основные преимущества магнитоэнцефалографии:

- возможность динамического исследования функционирования головного мозга и выявления функциональных расстройств до появления органических поражений;
- высокое разрешение по времени (миллисекунды), позволяющее обнаруживать отклик центральной нервной системы (ЦНС) на внешнее воздействие и выявлять отдельные волны или группы волн (паттерны), являющиеся отражением этого отклика либо свидетельствующие о переходе в то или иное функциональное состояние ЦНС;
- высокое пространственное разрешение (миллиметры), позволяющее определять локализацию функций головного мозга (сенсорной, речевой, моторной и др.);
- безвредность (отсутствие внешнего воздействия на объект);
- неинвазивность, позволяющая использовать СКВИД для исследования магнитной активности головного мозга без дополнительного стресса исследуемого объекта.

## Недостатки, ограничивающие широкое применение сверхпроводящей магнитометрии:

- отсутствие избирательности измерительного канала и возможности полностью избавиться от высоко-

амплитудного магнитного шума как внешнего, так и шумов измерительной аппаратуры с помощью активных и пассивных аппаратных методов подавления помех;

- необходимость сооружения дорогостоящей экранированной камеры с уровнем экранирования не менее 200 дБ (которая делает МЭГ малодоступной для широкого клинического и исследовательского применения) либо создания сложного математического аппарата для выделения информационной составляющей биомагнитного сигнала;

- отсутствие мобильности измерительного комплекса.

Согласно принятой теории, критерием оценки действенности на организм данной формы модулирующего сигнала является показатель степени ( $n$ ) степенной функции ( $A = F^{-n}$ ), аппроксимирующей часть спектра генерируемого сигнала. При этом, действие на биологический объект ЭМП с показателем степени  $n$  аппроксимирующей функции спектра модулирующего сигнала близким к показателю степени аппроксимирующей функции спектра вариаций сердечного ритма оказывает выраженный положительный эффект. Для различных биообъектов были определены диапазоны изменения показателя степени  $n$ ,  $[0,8 \leq n \leq 1,4]$ , в котором достигается наибольший положительный эффект. При формировании модулирующих сигналов с показателем степени  $n$  выходящим за рамки данного диапазона предположительно будет наблюдаться негативное действие ЭМП.

*Цель представленной работы* с помощью методов МЭГ и ЭЭГ оценить изменения электромагнитной активности головного мозга биологических объектов при воздействии на них сложномодулированного ЭМП нетепловой интенсивности с показателем степени  $n$  аппроксимирующей функции спектра модулирующего сигнала, выходящим за рамки диапазона  $[0,8 \leq n \leq 1,4]$ , и показать преимущества каждого из методов.

## Методы исследования

Во ВНИИЭФ в экспериментальных исследованиях функциональной активности головного мозга биообъектов разного уровня системной организации и ее изменений при воздействии внешних факторов, например электромагнитного поля (ЭМП), были исполь-

зованы методы одноканальной и многоканальной сверхпроводящей магнитоэнцефалографии и многоканальной электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Блок-схема биомагнитной измерительной системы, дополненная системой видеонаблюдения и магнитоэкранированной комнатой, приведена на рис. 1.

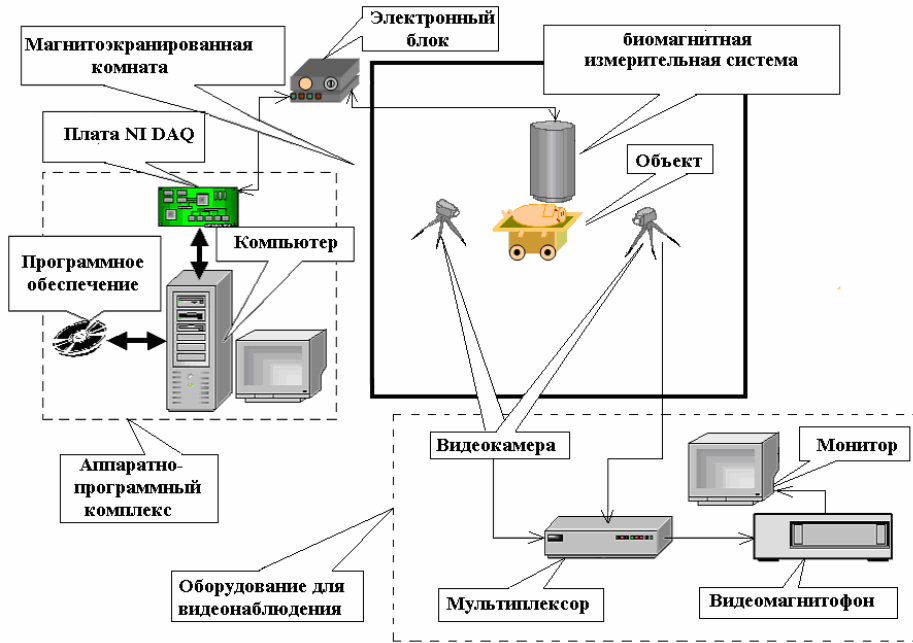


Рис. 1. Блок-схема многоканального биомагнитного измерительного комплекса

Схема комплекса для регистрации ЭЭГ с системой видеонаблюдения представлена на рис. 2.

дулирующих сигналов подбиралась с использованием богатого исследовательского опыта, имеющихся магнитотерапевтических наработок и согласно принятой в НИО-48 теории. В данной работе исследовали влияние воздействия на электромагнитную активность головного мозга биологических объектов сложномодулированного ЭМП высокочастотного диапазона нетепловой интенсивности (до  $50 \text{ мкВт/см}^2$ ) с показателями степени аппроксимирующей функции спектра модулирующего сигнала  $n \geq 1,4$  и  $n \leq 0,8$ .

### Выбор формы модулирующего сигнала для изучения воздействия сложномодулированного ЭМП на биообъекты

При воздействии на биообъекты сложномодулированного ЭМП несущая частота генератора подвергалась сложной амплитудной модуляции. Форма мо-

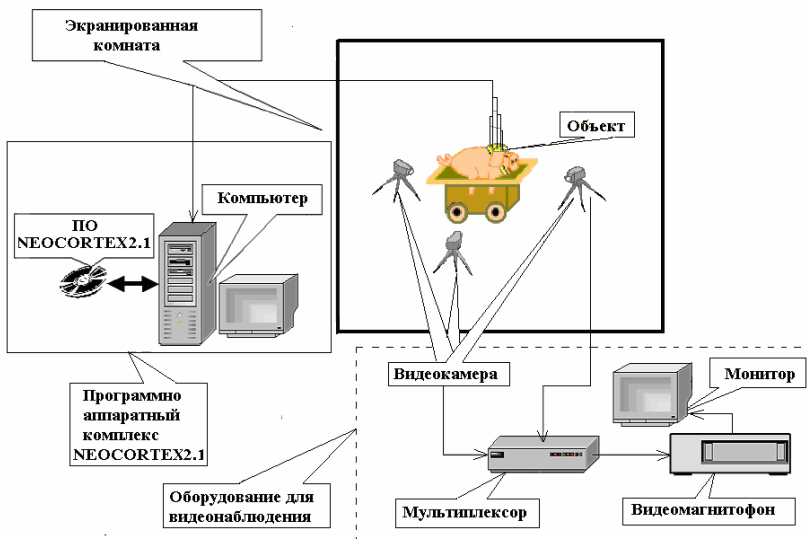


Рис. 2. Блок-схема электрографического измерительного комплекса



## Методика обработки и оценки параметров энцефалограмм

Для обработки и оценки параметров электроэнцефалограмм использовали стандартное программное обеспечение (ПО), входящее в электрографический измерительный комплекс.

Для обработки и оценки параметров магнитоэнцефалограмм использовалось ПО разработанное в НИО-48. В него входит:

- предварительная фильтрация высокоамплитудных геомагнитных и промышленных помех с помощью математического аналога адаптивного фильтра;
- узкополосная режекторная фильтрация низкоамплитудных стационарных помех в сверхнизкочастотной области методом Бесселя;
- расчет и построение выборочных спектральных плотностей мощности (СПМ) методом дискретного преобразования Фурье корреляционных функций сигналов для увеличения отношения сигнал/шум [5];
- расчет и построение распределения во времени выборочных СПМ;
- усреднение СПМ по всей реализации сигнала методом Барлетта для сглаживания случайных импульсных помех [6];
- нормировка СПМ на диапазоне до 35 Гц;
- расчет нормированной мощности компонент МЭГ с использованием численного интегрирования;
- сравнительный анализ среднего значения нормированной мощности каждой из компонент МЭГ после воздействия (ЭМП или другим фактором) со средним значением той же характеристики контрольной группы на каждом диапазоне. В качестве критерия достоверного отклонения использовали  $t$ -критерий Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  [7];
- расчет дискриминантных функций и построение двухкоординатных графиков дискриминантных переменных.

Для оценки изменений МЭГ при воздействии на животных ЭМП выделяли на СПМ частотные диапазоны, соответствующие ритмам мозговой активности и рассчитывали нормированную энергию компонент МЭГ.

В качестве критерия достоверного отклонения использовали  $t$ -критерий Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Для наглядности расчет среднего значения нормированной энергии компонент МЭГ исследуемой и контрольной групп и критической области представляли графически и определяли значения нормированной мощности МЭГ экспериментальной группы выходящие за пределы критической области, определяемой для двух выборок при условиях:  $t$ -крит:  $1 - 2\alpha$  и  $d.f. = N_1 + N_2 - 2$  как

$$t_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} \left( \bar{P}_1 - \bar{P}_2 \right),$$

где  $N_1$  – число степеней свободы первой выборки (опытной группы);  $N_2$  – число степеней свободы второй выборки (контрольной группы);  $P_1$  – среднее значение относительной энергии компонент МЭГ для опытной группы;  $P_2$  – среднее значение относительной энергии компонент МЭГ для контрольной группы.

## Результаты исследований. Сопоставление результатов электрографических и биомагнитных исследований

Последовательная регистрация спонтанной и вызванной электромагнитной активности головного мозга биообъектов и дальнейший анализ энцефалограмм по эпохам с одинаковой длительностью (8 с) показал, что характер временных функций энцефалограмм, полученных электрофизическим и биомагнитным методами в целом совпадает.

• При проведении спектрального анализа ЭЭГ и МЭГ выявлено совпадение центральных частот основных ритмов энцефалограмм.

• При проведении функциональных проб и воздействия ЭМП у объектов выявлены достоверные ( $p \leq 0,05$ ) однонаправленные отклонения от контроля средних значений относительных суммарных потенциалов в частотных диапазонах естественных ритмов ЭЭГ и средних значений относительной плотности энергии компонент МЭГ.

• Как ЭЭГ, так и МЭГ позволили с одинаковым уровнем значимости (до  $p < 0,0868$ ) распознать различные состояния биообъектов при разных функциональных нагрузках с приблизительно одинаковым процентом правильных решений.

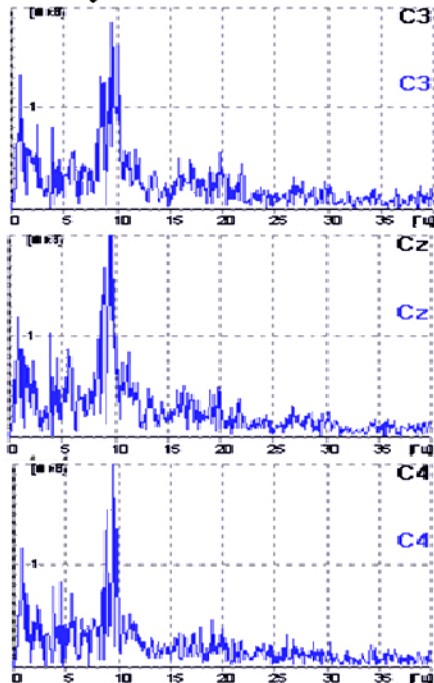
Ниже на рис. 3 представлены примеры спектральных характеристик спонтанных ЭЭГ и МЭГ человека, зарегистрированных с центральной области головы с закрытыми глазами.

В результате проделанной работы были выявлены следующие преимущества СКВИД-магнитометрии:

1. На МЭГ амплитуда бета-ритма существенно выше, чем на ЭЭГ. Это указывает на независимость результатов регистрации ЭМП глубоко залегающих структур головного мозга от электрического сопротивления биотканей головы. При регистрации биоэлектрической активности имеет место ослабление и рассеяние сигнала.

2. Электроэнцефалография не позволяет определять локализацию источника вызванных потенциалов, т. к. регистрирует относительное изменение электрического потенциала между измерительным и индифферентным электродами. СКВИД регистрирует абсолютное значение тангенциальной составляющей магнитной индукции от источника, расположенного непосредственно под приемной катушкой и, следовательно, позволяет определять его локализацию и построить карту расположения токовых диполей по конвексальной поверхности головы.

### Спектральные характеристики ЭЭГ испытуемого №3



### Спектральные характеристики МЭГ испытуемого №3

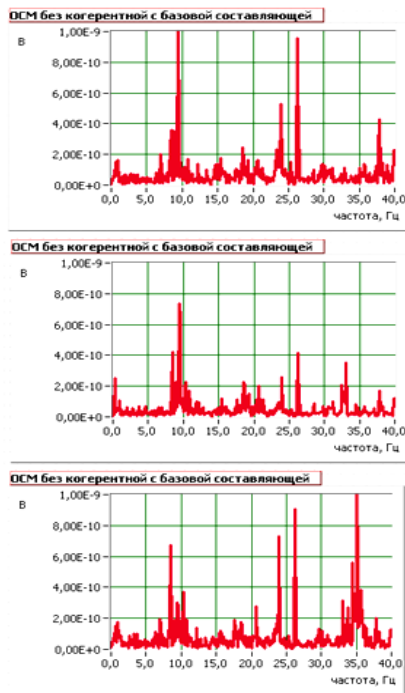


Рис. 3. Амплитудные спектры спонтанных ЭЭГ и МЭГ одного и того же человека, зарегистрированные с центральной области головы с закрытыми глазами

3. В одном и том же интервале времени, при регистрации магнитометрическим методом амплитуды низкочастотных компонент (дельта- и тэта-ритмов) в спектре МЭГ практически постоянны, а в спектре ЭЭГ имеют место значительные колебания амплитуды этих компонент из-за изменения кожно-гальванического сопротивления покрова головы в местах крепления электродов. Это накладывает существенные ограничения на использование электрографического метода при исследовании мозговой активности лабораторных животных.

4. Биомангнитная измерительная система позволяет без применения дополнительного оборудования проводить измерения магнитной активности мозга не только людей, но и животных с различными размерами и морфологическим строением черепа. Метод МЭГ позволяет обнаруживать закономерности изменения психофизиологического состояния ЦНС, включая реактивные фазовые сдвиги в макро и микроструктурах мозга. Это особенно важно при работе с лабораторными животными, т. к. электрографический метод для подобных исследований требует вживления электродов.

5. Программное обеспечение, разработанное для математической обработки биомангнитного сигнала, предоставляет широкие возможности для проведения различных научных исследований и сложного анализа энцефалограмм, так как обладает возможностью практически неограниченного выбора параметров и численных методов обработки и анализа сигналов. Этими возможностями не обладает ни одна электрографическая система, выпускаемая серийно.

Основное преимущество метода ЭЭГ в его мобильности.

### Результаты действия ЭМП высокочастотного диапазона нетепловой интенсивности (до 50 мкВт/см<sup>2</sup>) на биомангнитную активность головного мозга лабораторных животных

В процессе воздействия на биологические объекты сложномодулированного ЭМП с показателем степени аппроксимирующей функции спектра модулирующего сигнала  $n \geq 1,4$  и  $n \leq 0,8$  у животных на ЭЭГ и МЭГ были обнаружены выраженные изменения ритмики активности головного мозга и графоэлементы, отражающие нарушение его нормального функционального состояния:

- рост дельта и тэта-активности, отражающий рост беспокойства и напряжения;
- всплеск локальной или диффузной высокочастотной бета-активности, всплеск генерализованной низкочастотной активности);
- падение общей энергии ЭЭГ чередующееся с всплеском дельта и тэта-активности;
- наблюдались высокоамплитудные шлемовидные волны, К-волны, пик-волны и комплексы этих элементов;
- общее падение энергии ЭЭГ, свидетельствующее об утяжелении отрицательных симптомов.

На рис. 4–6 представлены примеры 8-ми секунд-ных эпох энцефалограмм крупных лабораторных жи-вотных с графоэлементами нарушенной ритмики ак-тивности головного мозга.

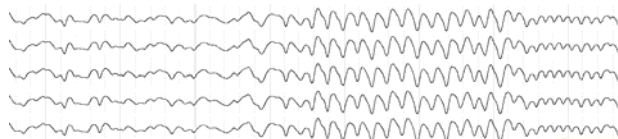


Рис. 4. Всплеск генерализованной низкочастотной активности

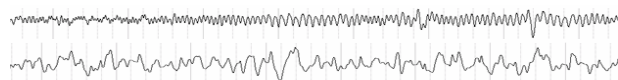


Рис. 5. Всплеск низкочастотной активности и общее падение ЭЭГ

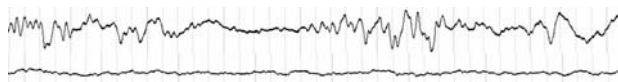


Рис. 6. Всплеск разного вида бета-ритма

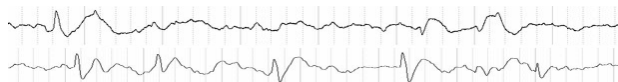


Рис. 7. Элементы судорожной активности

## Канонический дискриминантный анализ

По результатам анализа ЭЭГ и МЭГ после воз-действия на крупных лабораторных животных двух видов сложно модулированного ЭМП с показателем степени аппроксимирующей функции спектра моду-лирующего сигнала  $n \geq 1,4$  и  $n \leq 0,8$  были обнаруже-ны измененные функциональные состояния ЦНС. Канонический дискриминантный анализ выявленных из-мененных состояний показал хорошую их дискрими-нуемость с процентом правильных решений от 79,0 до 88,9 %, что подтверждает выраженный характер выявленных изменений ритмической активности го-ловного мозга (по мощности от дельта-ритма до гам-ма-ритма).

Была проведена оценка следующих состояний:

- «Норма» – ЭЭГ в спокойном состоянии без воз-действия;
- «ПЭЭГ» – продолжительные отрезки плоской ЭЭГ (ПЭЭГ) или полиморфной низкоамплитудной ак-тивности, длительность которых превышает 12 с;
- «Ирритация» – функциональное состояние объ-екта, для которого характерна генерализованная пароксизмальная активность в бета2- и гамма-диапазоне;
- «НЛД» – нарушение ликвородинамики ЭЭГ, ха-рактеризующееся одновременным гиперсинхронным

появлением вспышек медленной активности с по-следующей пароксизмальной активностью в бета2- и гамма-диапазоне.

При различении состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» по ЭЭГ животных первого вида процент правильных решений составил 82,0 %. Двухкоорди-натный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» приведен на рис. 8 а).

При различении состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» по МЭГ животных первого вида процент правильных решений составил 79,0 %. Двухкоорди-натный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» приведен на рис. 8 б).

При различении состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» по ЭЭГ животных второго вида процент правильных решений составил 88,9 %. Двухкоор-динатный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма» приведен на рис. 8 в).

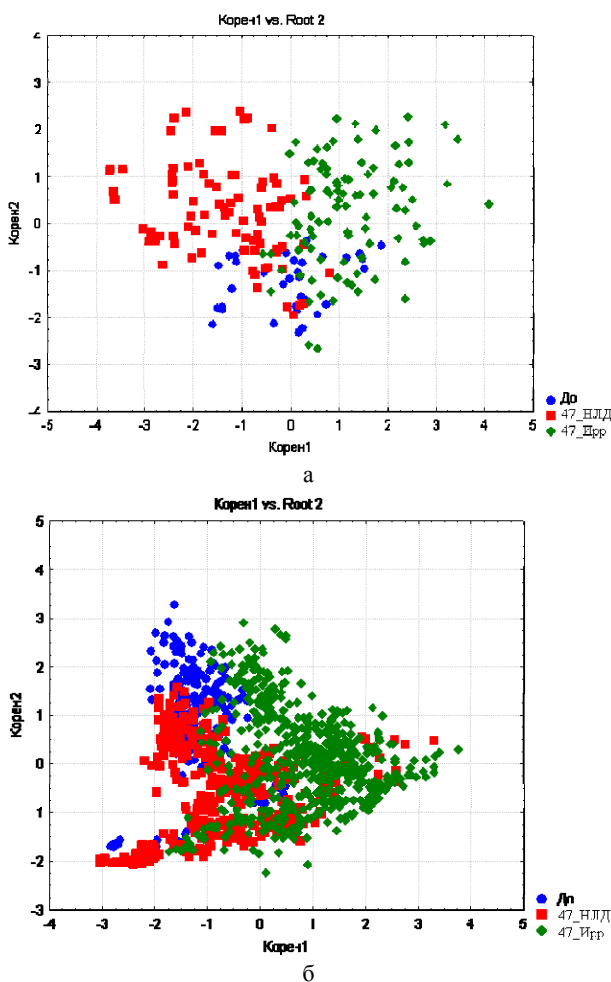


Рис. 8. Двухкоординатный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний «Ирритация», «НЛД» и «Норма»: а – для животных первого вида по ЭЭГ; б – для животных первого вида по МЭГ; в – для животных второго вида по ЭЭГ (см. также с. 225)

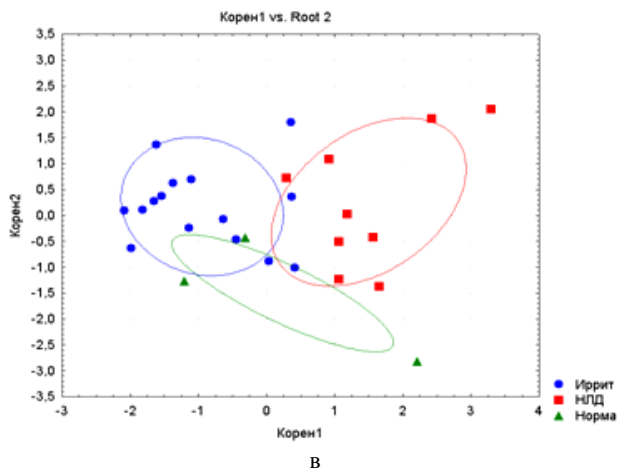


Рис. 8. Окончание

При различении состояний «Ирритация», «НЛД» и «ПЭЭГ» процент правильных решений составил 85,7 %. Двухкоординатный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний «Ирритация», «НЛД» и «ПЭЭГ» приведен на рис. 9.

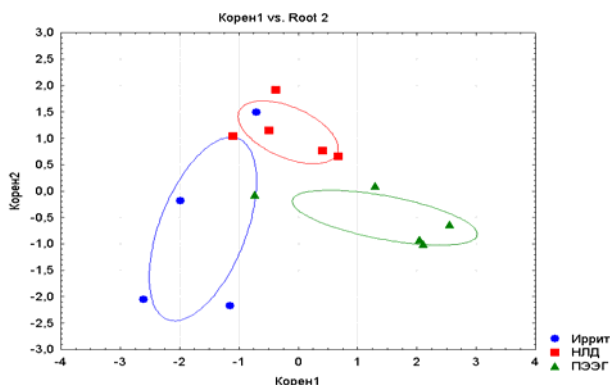


Рис. 9. Двухкоординатный график корней канонических уравнений при дискриминации состояний животных второго вида по ЭЭГ «Ирритация», «НЛД» и «ПЭЭГ»

В ходе проведенных исследований выявлено:

- Применимость метода сверхпроводящей магнитометрии в совокупности с предложенной методикой математической обработки для регистрации спонтанных и вызванных биомагнитных сигналов мозговой активности биообъектов разного уровня системной организации при условии слабого экранирования СКВИД-системы (40 дБ).

- Негативное влияние на ритмику головного мозга биообъектов ЭМП нетепловой интенсивности с огибающей спектра, соответствующей функции  $f^{-n}$ , при условии отклонения значения показателя степени  $n$  от диапазона  $0,8 \leq n \leq 1,4$ .

- Хорошая дискриминируемость выявленных измененных состояний как по ЭЭГ, так и по МЭГ при использовании канонического дискриминантного анализа с процентом правильных решений от 79 до 88,9 %.

- Дополнительные к общеизвестным преимущества метода МЭГ, позволяющие проводить сложный анализ энцефалограмм и оценивать закономерности изменения психофизиологического состояния ЦНС биообъектов при проведении экспериментальных исследований по определению механизмов и критериев воздействия внешних факторов.

## Литература

1. Кнеппо П., Титомир Л. И. Биомагнитные измерения. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Romany G. L., Wilyamson S. D., Kaufman L. D. Biomagnetic instrumentation // Rev. Sci. Instruments. 1982. Vol. 53, N 12. P. 1815–1845.
3. Зенков Л. Р. Клиническая электроэнцефалография. М.: МЕДпресс-информ, 2002.
4. Поворинский А. Г., Заболотных В. А. Пособие по клинической электроэнцефалографии. Л.: Наука, 1987.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
6. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение ЦОС: Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
7. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2001.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ФРАГМЕНТИРОВАННЫМ ФАРАДЕЕВСКИМ ДАТЧИКОМ

*В. В. Грушко, А. Н. Моисеенко, А. В. Филиппов, О. М. Таценко, С. А. Казаков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время достигнуты высокие результаты в экспериментах по получению мягкого рентгеновского излучения, генерируемого при токовой имплозии цилиндрических лайнеров в геометрии Z-пинча. Этот вид излучения можно использовать для зажигания термоядерных мишеней. Известно, что для зажигания мишени необходимо сформировать в нагрузке импульс тока амплитудой  $\sim 60$  МА с временем нарастания менее 1 мкс [1]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ такие токи обеспечиваются дисковыми взрывомагнитными генераторами (ДВМГ). Так, например, с помощью генератора ДВМГ480 получен ток  $\sim 100$  МА с характерным временем нарастания 6,5 мкс [2].

Измерения тока на электрофизических установках проводятся, как правило, с помощью гальванических (шунтов) и индукционных (дифференцирующих и интегрирующих) датчиков. Но на мощных импульсных установках существует проблема обеспечения гальванической развязки датчиков тока с регистрирующей аппаратурой. Проблема вызвана необходимостью защиты дорогостоящих регистраторов от воздействия высоких потенциалов, развивающихся как на самих датчиках, так и при работе установки. Кроме того, из-за высокой чувствительности гальванических и индукционных датчиков, их возможности ограничены при измерениях сверхвысоких ( $10^7$ – $10^8$  А) токов.

Проблема обеспечения измерений мультимегаамперных токов в опытах с ДВМГ снимается при использовании магнитооптических датчиков, работа которых основана на использовании эффекта Фарадея [3]. Однако и в этом случае имеются технические сложности. Ранее такие измерения проводились, когда магнитооптические датчики располагались в виде колец в полостях вокруг цилиндрического токопровода, по которому протекает ток. Особенностью ДВМГ является то, что они успешно работают на низкоиндуктивные нагрузки. Поэтому в экспериментах с ДВМГ и лайнерными системами количество и размеры полостей для размещения датчиков ограничены из-за необходимости снижения величины паразитной индуктивности в цепи нагрузки. Отсюда количество измерений импульса тока в нагрузке ДВМГ магнитооптическим методом, как правило, ограничено одним-двумя. В случае механического повреждения хрупких оптоволоконных световодов (что иногда происходит при проведении монтажных работ с изделием в поли-

гонных условиях) существует риск частичной или полной потери информации о параметрах импульса тока.

Информативность измерений можно повысить, не изменяя индуктивности контура, если использовать несколько магнитооптических датчиков, размещенных в одной полости. В отличие от кольцевого магнитооптического датчика, каждый из датчиков выполняется в виде фрагмента кольца. Фрагментированный датчик регистрирует только часть полного тока. Полный ток определяется методом интегрирования по всему контуру. Предложенный метод регистрации можно использовать для изучения симметричности растекания тока в контуре ДВМГ. В докладе представлены результаты измерений тока в индуктивной нагрузке дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ-480 кольцевым и фрагментированным фарадеевскими датчиками.

## Экспериментальная установка и схема измерений

Генератор ДВМГ480 является источником энергии во взрывной электрофизической установке ЭМИР, предназначенной для генерации импульса мягкого рентгеновского излучения при схлопывании многопроволочного лайнера, который будет использоваться для зажигания термоядерных мишеней. Схема генератора ДВМГ480 показана на рис. 1.

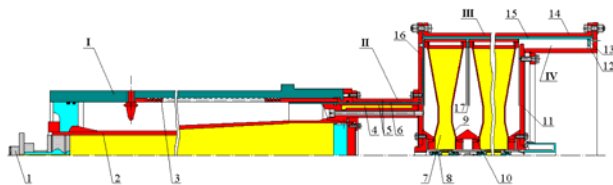


Рис. 1. Схема генератора ДВМГ480 с предусилителем энергии ВМГ-240: I – предусилитель; II – узел отключения предусилителя; III – ДВМГ; IV – нагрузка; 1 – электродетонатор; 2 – центральная труба с зарядом ВВ; 3 – спираль; 4 – заряд ВВ; 5 – электрод; 6 – изолятор; 7 – дисковый заряд ВВ; 8 – устройство иницирования дисковых зарядов; 9 – дисковая оболочка; 10 – конус; 11, 16 – торцевые стенки; 12 – оптический датчик; 13 – индукционный датчик; 14 – корпус; 15, 17 – изоляторы

Устройство запитывается от предусилителя I – спирального ВМГ, – и включает в себя узел отключения предусилителя II, пять дисковых элементов III,



и нагрузку IV. При срабатывании ДВМГ сжимаемый магнитный поток вытесняется в нагрузку через передающую линию, т. е. через зазор между дисковыми элементами и наружным корпусом 14 генератора. Магнитооптические датчики из специального измерительного оптоволоконного световода типа LB 600 размещались в нагрузке ДВМГ на токопроводе 12. В нагрузке также размещалось несколько индукционных дифференцирующих датчиков, регистрирующих производную тока ДВМГ.

Оптическая схема измерения тока представлена на рис. 2.

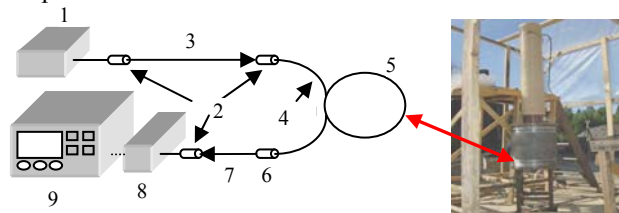


Рис. 2. Оптическая схема измерения тока: 1 – лазер; 2 – оптический адаптер; 3 – одномодовый световод ПАНДА; 4 – измерительный световод LB 600; 5 – токопровод ДВМГ480; 6 – анализатор; 7 – многомодовый световод 100/140; 8 – фотоприемник; 9 – осциллограф

Свет от лазера 1 передавался с помощью одномодового световода 3 типа ПАНДА, сохраняющего плоскость поляризации зондирующего света, на измерительное волокно LB600 – 4. Это волокно изменяет плоскость поляризации зондирующего света при воздействии магнитного поля. Одномодовое оптоволокно ПАНДА использовалось для передачи света на датчик, сохраняя плоскость поляризации зондирующего света, а также для достижения наименьшей дисперсии светового пучка. Свет, проходя через датчик 4, анализатор 6 и отводящий многомодовый световод 7, попадал в фотоприемник 8. Сигнал с фотоприемника регистрировался при помощи осциллографа 9.

Рассмотрим отдельно некоторые элементы оптической системы. Оптоволоконный датчик, работающий на эффекте Фарадея, представлял собой свернутый в кольцо световод типа LB600. Использовались три датчика (рис. 3).

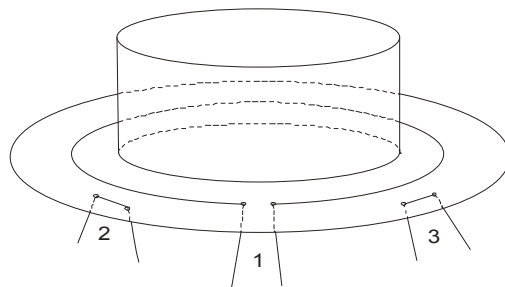


Рис. 3. Схема размещения магнитооптических датчиков тока: 1 – датчик общего тока; 2, 3 –фрагментированные датчики

Первый датчик представлял собой полный виток вокруг токопровода диаметром 531 мм (+ 4,5 мм каркас для датчика) и измерял общий ток. Таким образом, длина составляла 1680 мм. Два других были петлями с прямыми участками длиной по 50 мм и представляли собой фрагментированные фарадеевские датчики тока. Из этого следует, что показания с первого датчика должны быть в 33 раза больше показаний с датчиков 2 и 3.

В качестве источника зондирующего излучения использовались три типа лазеров: 1 – полупроводниковый лазер с длиной волны 0,66 мкм, 2 – He-Ne лазер с длиной волны 0,63 мкм, 3 – полупроводниковый лазер с длиной волны 0,85 мкм.

Данные с фотоприемников регистрировались осциллографом TDS 3054. Данный осциллограф имеет временное разрешение 2 нс, что соответствует условиям эксперимента.

## Экспериментальные данные

На рис. 4 представлена осциллограмма изменения интенсивности света, зарегистрированная фотоприемником для датчика общего тока, а на рис. 5 – для фрагментированного датчика. Результаты обработки осциллограмм представлены на рис. 6.

К сожалению, датчик 3 был выведен из строя при монтаже установки, поэтому данные с него получить было невозможно.

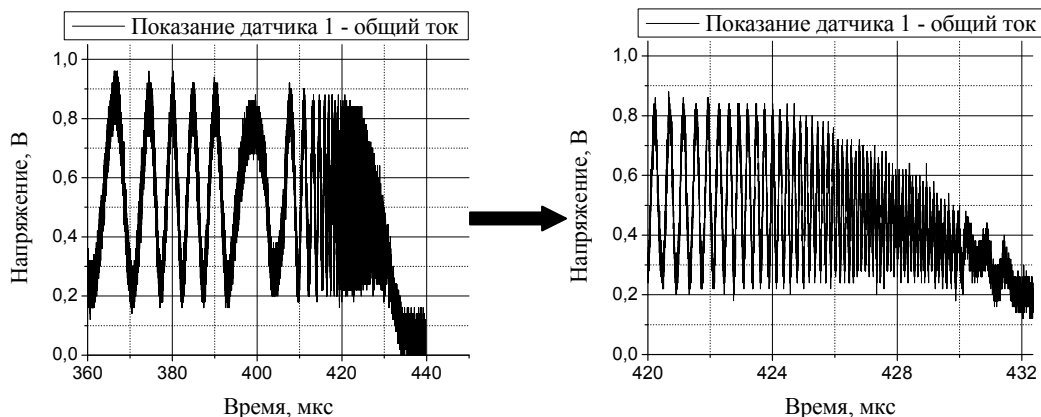


Рис. 4. Данные с фотоприемника для датчика общего тока

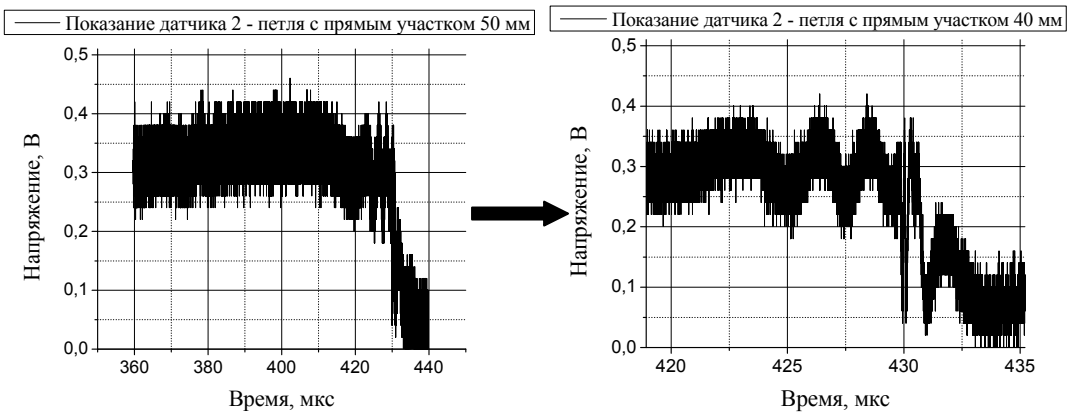


Рис. 5. Данные с фотоприемника для фрагментированного датчика

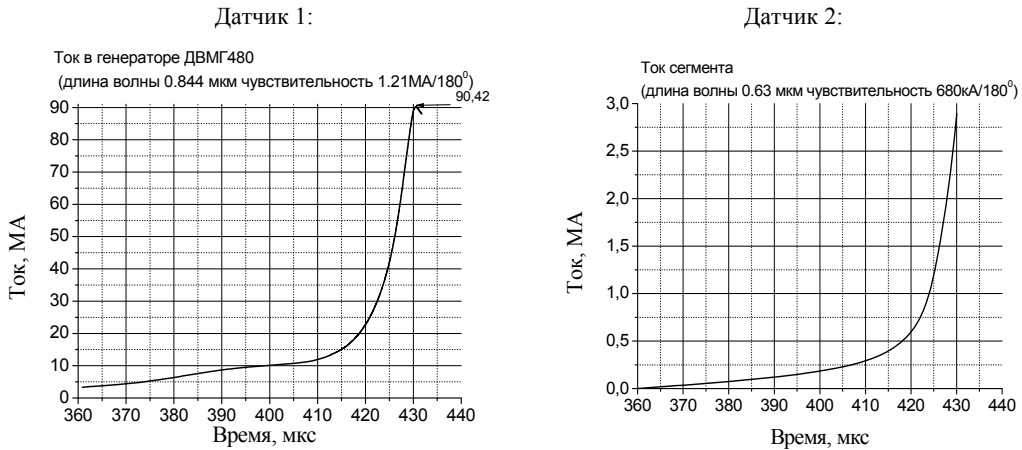


Рис. 6. Зависимость тока в генераторе ДВМГ480 от времени, измеренная оптическим методом с помощью одномодового световода: слева – датчик общего тока, справа – фрагментированный датчик

Для сопоставления результатов токовые зависимости, полученные с помощью датчиков 1 и 2, совмещенные по времени, представлены на рис. 7. Видно, что по характеру изменения тока показания с обоих датчиков практически одинаковы. Это свидетельствует о принципиальной возможности применения

фрагментированных фарадеевских датчиков для измерений тока в опытах с ДВМГ. Более того, показания фрагментированного датчика и датчика общего тока совпадают и показывают значение 90,4 МА, что практически соответствует результатам измерений индукционными датчиками (~ 94 МА).

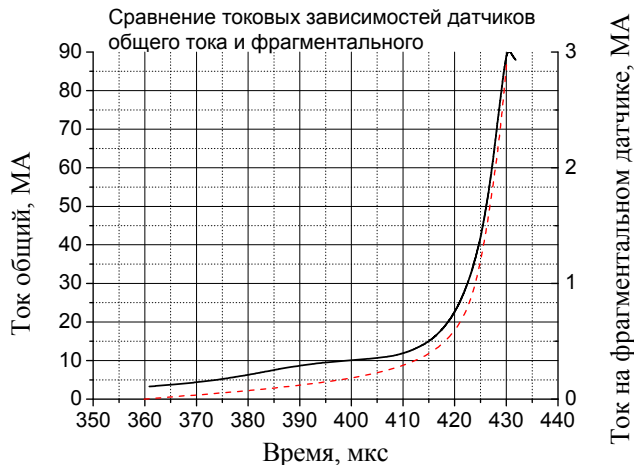


Рис. 7. Сравнение токовых зависимостей датчиков общего тока и фрагментального



В эксперименте с пятиэлементным дисковым взрывомагнитным генератором с зарядом взрывчатого вещества диаметром 480 мм при повышенной запитке от предусилителя энергии проведены измерения тока кольцевыми и фрагментированными магнитооптическими датчиками, работающими на эффекте Фарадея. Результаты измерений сравнивались с результатами измерений, проведенными с помощью индукционных датчиков. Показания фрагментированного датчика и датчика общего тока совпадают и показывают значение 90,4 МА, что практически соответствует результатам измерений индукционными датчиками (~ 94 МА). В дальнейшем будет рассмотрена и воспроизведена схема с большим количеством фрагментальных датчиков для определения равномерности протекания тока в установке. Предложенный метод регистрации тока позволяет расширить диагностические возможности во взрывных опытах.

1. Stygar W. A., Cuneo M. E., Headley D. I., Ives H. C. et al. Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators. *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2007. Vol. 10, 030401.
2. Демидов В. А., Селемир В. Д., Борискин А. С., Казаков С. А. и др. Испытание дискового взрывомагнитного генератора диаметром 480 мм при повышенной запитке // XIII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам: Доклад на Международную конференцию «Мегагаусс-13». Китай. 6–10 июля 2010 г.
3. Моисеенко А. Н., Долотенко М. И., Маркевцев И. М., Савченко Р. В., Таценко О. М., Козлов М. Б. Оптические измерения тока магнитокумулятивного генератора МК-1 // Отчет о НИР ВНИИЭФ. 2001, № 4/10187. С. 18.

# ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМСТОЙКОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ (ВВ)

*И. И. Давыдов, И. Р. Шакиров, Н. С. Хохлов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Медленное химическое разложение ВВ, в отличие от горения и детонации, протекает не в узком фронте реакции, а одновременно во всей массе вещества.

При обычных температурах процесс разложения ВВ идет чрезвычайно медленно и очень трудно качественно или количественно оценить его скорость. Опытное определение стойкости ВВ ведется при повышенных температурах, при которых скорость реакции разложения заметно повышается.

В основе методов определения химической стойкости лежит допущение, что если при одинаковых условиях испытания (повышенная температура) одно из двух ВВ оказалось менее стойким, чем другое, то первое будет менее стойким и при длительном хранении в условиях нормальной температуры.

На государственном заводе № 2 химстойкость определяется следующими методами: манометрической пробой, фотоэлектроколориметрическим методом и рН-методом. Для термостатирования ВВ в лаборатории 205 использовалась установка СЖМЛ-19/2,5-И1-Т4.2 – 1959 г. в. Данная установка помимо морального и физического старения имела следующие недостатки:

- использование в качестве теплоносителя пожароопасной водно-глицериновой смеси;
- длительность выхода на рабочий режим (около 2–3 ч);
- инерционность в достижении заданной температуры и поддержании ее на необходимом уровне с требуемой точностью (малейшие скачки напряжения в сети влияли на температуру теплоносителя);
- трудоемкость и субъективность регистрации температуры (регистрация температуры по «слепой» шкале термометра в термостате);
- термостаты не были рассчитаны на действие взрыва ВВ (при нагревании ВВ вероятность взрыва очень высока, следовательно мог пострадать персонал лаборатории);
- степень защиты оболочки оборудования (термостатов) не соответствовала требованиям правил ПВБ 87/97 и ПУЭ (не ниже чем IP 54).

То есть установка для термостатирования ВВ, с последующим определением химической стойкости и степени безопасности при обращении с ними, сама была не безопасна.

В настоящее время произведена замена старой установки СЖМЛ-19/2,5-И1-Т4.2 на современный измерительно-вычислительный комплекс «Вулкан-2000СМ». Комплекс предназначен для термостатирования веществ, измерения давления и температуры паров и га-

зов в замкнутом объеме с последующим определением термостабильности исследуемого материала, проводимой по аттестованной методике.

В состав данного комплекса (рис. 1) входят:

- блок электропневматический (1);
- 2 термостата (2) с 16-мя первичными преобразователями (3) для определения химстойкости манометрическим способом;
- 2 термостата (4) для определения химстойкости рН-методом;
- устройство подготовки первичных преобразователей (5) с пультом (6);
- промышленный компьютер (7).



Рис. 1. Состав ИБК «Вулкан-2000СМ»

Данный комплекс выполняет следующие функции:

- диалоговый режим настройки и управления работой комплекса;
- автоматическое регулирование температуры в термостатах;
- представление информации о состоянии комплекса и ходе эксперимента в виде таблиц, графиков, оперативных сообщений;
- протоколирование работы системы.

Система управления ИБК «Вулкан-2000СМ» представляет собой двухуровневый программно-технический комплекс. На верхнем уровне используется промышленный компьютер. На нижнем уровне программируемый контроллер.

Данные о начальных условиях и результаты измерения температуры и давления поступают в промышленный компьютер. Полное управление процессом измерения давления и температуры в термостатах осуществляет контроллер, расположенный в блоке электропневматическом.

Работа комплекса в реальном времени осуществляется под управлением специального программного обеспечения. ПО ИБК «Вулкан-2000СМ» включает в свой состав программное обеспечение верхнего

уровня (ПО для ПК) и программное обеспечение нижнего уровня (ПО для контроллера). ПО верхнего уровня работает в среде операционной системы Windows 98, Windows NT4.0 и выше. ПО нижнего уровня работает под управлением МиниОС-7 (аналог операционной системы DOS).

Работа ИВК основана на измерении давления газов и паров распада веществ в замкнутой реакционной камере первичного преобразователя в изотермическом режиме с записью измеренных значений и дальнейшей обработки их по стандартным методикам, предназначенных для математической обработки и моделирования процессов.

Встроенные средства обработки включают в себя вывод на монитор или на принтер таблиц и графиков измерений по одному или нескольким первичным преобразователям.

Для измерения давления используется компенсационный метод (рис. 2), основанный на регистрации равенства давления в реакционной камере и компенсирующего давления воздуха в измерительной камере первичного преобразователя с одновременным измерением компенсирующего давления.

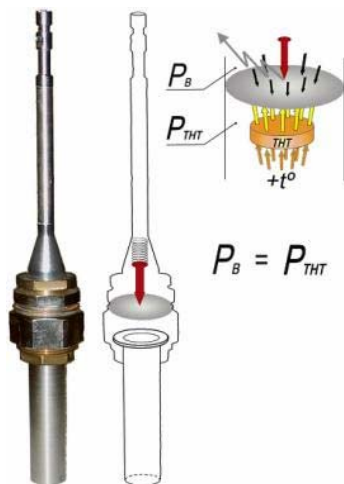


Рис. 2. Компенсационный метод измерения давления в первичном преобразователе

Для определения химстойкости фотоэлектроколориметрическим и рН-методами используют термостат МПЗ 03.00.00.000-СМ совместно со специальными пробирками (рис. 3). Конструкция термостата МПЗ 03.00.00.000-СМ отличается от термостата МПЗ 03.00.00.000 тем, что в термостате отсутствует пневмоарматура, а блок нагревателя (1) увеличен в длину. Использование, в качестве прототипа, термостата от ИВК «Вулкан-2000» позволяет обеспечить такие же характеристики по точности задания температуры, как и штатным термостатом.

Конструкция термостата дает возможность за счет использования теплоизоляционных заглушек погружать стеклянные пробирки (3) с исследуемым веществом на заданную глубину, а также использовать защитные гильзы (4), предохраняющие стеклянные пробирки от слома, а в случае поломки пробирки, легко удалять ее содержимое из термостата.

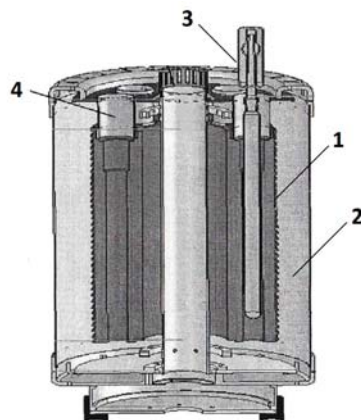


Рис. 3. Термостат МПЗ 03.00.00.000-СМ в разрезе: 1 – блок нагревателя; 2 – теплоизоляция; 3 – стеклянная пробирка; 4 – защитная гильза

В сравнении со старой установкой СЖМЛ-19/2,5-И1-Т4.2 новый ИВК обладает следующими плюсами:

- степень защиты оболочки оборудования термостатов удовлетворяет требованиям правил ПВБ 87/97 и ПУЭ;

- термостат рассчитан на действие взрыва 16 г ВВ в пересчете на тротил;

- увеличение производительности труда: в комплекс может входить до четырех термостатов;

- поддержание заданной температуры в термостатах с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,2$  °С, дискретность задания температуры термостатирования 0,1 °С;

- автоматическое отключение термостатов в случае аварийного превышения заданной температуры;

- отображение состояния комплекса, в частности, текущей температуры и давления в термостатах, на экране монитора и вывод на цифropечатающее устройство;

- возможность оперативного контроля и наблюдения за работой технических средств комплекса в безопасной зоне: функциональное рабочее место по определению химической стойкости ВВ расположено в двух помещениях (в одном – термостаты с навесками ВВ, в другом – оператор и технические средства по управлению комплексом);

- высокий уровень организации рабочего места.

После написания инструкции по эксплуатации на данный комплекс, проверена работоспособность ИВК «Вулкан-2000СМ», т. е. проведено термостатирование ВВ с последующим определением химической стойкости. Полученные результаты удовлетворяют требованиям НД. Таким образом, можно утверждать, что данный ИВК соответствует современным требованиям безопасности и позволяет проводить определение химстойкости как рН- и ФЭК-методами, так и по манометрической пробе.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ДИСКОВЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

А. А. Еремин, Д. И. Лобачев, Л. В. Львов, И. Е. Чернов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Ранее в РФЯЦ-ВНИИЭФ проектировалась мощная многоканальная лазерная установка на неодимовом стекле, назначением которой является проведение экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза. Экспериментальное исследование вопросов, связанных с созданием такого лазера, осуществляется на лазерной установке «Луч» [1].

«Луч» – четырехканальная лазерная установка на неодимовом фосфатном стекле. Для транспортировки светового импульса от задающего генератора до мишени разработана оптическая система [2], представленная на рис. 1. Она имеет особенности, связанные с четырехпроходным режимом усиления, высокими плотностями энергии на оптических элементах, большими углами наклона активных элементов усилителей. Каждый элемент оптической системы вносит искажения в форму волнового фронта (ВФ). Количество оптических поверхностей в каждом канале установки более 200, значительна длина оптического пути в стекле. Как следствие, актуальна задача обеспечения качества волнового фронта на выходе оптического тракта, необходимого при фокусировке излучения на мишень. Поэтому возникает необходимость контроля качества оптических элементов с целью последующей их отбраковки и комбинирования таким образом, чтобы aberrации компенсировали друг друга и были минимальны.

## Описание интерферометра радиального сдвига

Для исследования качества волнового фронта дисковых активных элементов (ДАЭ) был выбран циклический интерферометр радиального сдвига с коллимированным ходом лучей, представленный на рис. 2.

Световой пучок, вышедший из лазера, попадает на стеклянную пластинку PL, а затем разделяется на два разных по интенсивности пучка. Лазерное излучение, прошедшее через нее, падает последовательно на зеркала M2 и M1, попадает снова на пластинку PL, где частично отражается от нее, а частично проходит и падает на регистрирующую матрицу видеокамеры. Другой интерферирующий пучок, проходит путь обратный первому и также падает на ссd-камеру. Радиальный сдвиг образуется за счет телескопической системы (ТС) 2, состоящей из линз L3 и L4 с различными фокусными расстояниями  $f_3$  и  $f_4$  [3]. Параметры использованных линз представлены в табл. 1, размеры излучения на них приведены в тексте.

Для согласования интенсивности интерферирующих пучков, подаваемых на регистрирующую матрицу ссd-камеры, кратность телескопической системы должна составлять  $\approx 3$ .

Чтобы полностью осветить ДАЭ, необходимо расширить пучок до размеров  $220 \times 220$  мм. Для этого была разработана автоколлимационная схема – схема регистрации интерферограмм (рис. 3). ДАЭ вставлялся

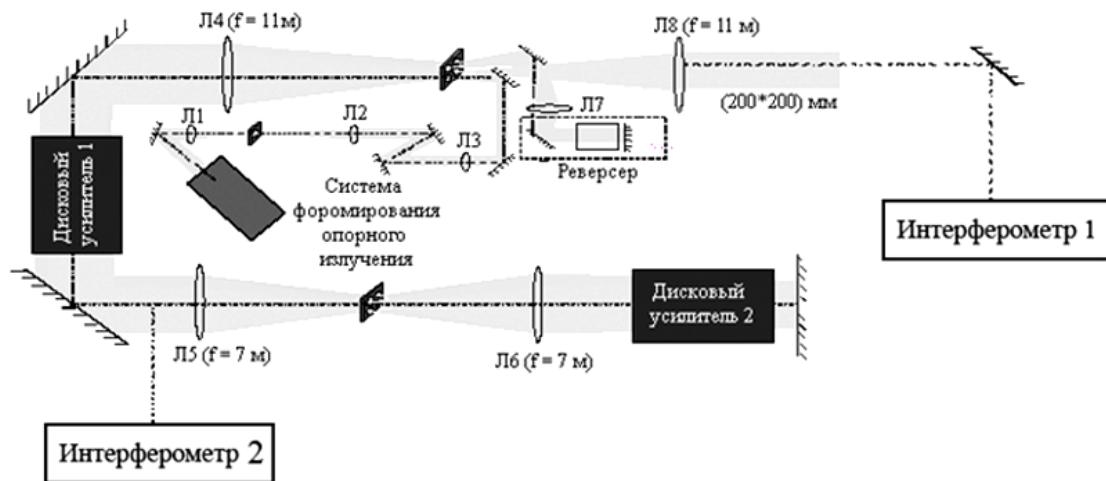


Рис. 1. Оптическая схема установки «Луч»

Характеристики линз интерферометра

Линза	Диаметр, мм	Фокусное расстояние, мм
L1	400	11000
L2	100	1200
L3	35	200
L4	100	600

между линзой L1 и зеркалом M3. Расширение излучения достигается за счет телескопической системы, состоящей из линз L1 и L5. Для согласования размеров подаваемого на вход интерферометра излучения с размерами регистрирующей матрицы, необходимо выбрать линзу L2 таким образом, чтобы кратность телескопической системы, состоящей из линз L1 и L2 составляла  $\approx 9$ . Размеры пучка на линзе L1:  $D_0 = 220 \times 220$  мм, после прохождения ТС 1 –  $D = 23,9 \times 23,9$  мм. Размер после прохождения первой ветки интерферометра (по пути уменьшения изображения телескопической системой):  $D_1 = 7,2 \times 7,2$  мм. Ширина пучка после прохождения второй ветки интерферометра (по пути увеличения изображения телескопической системой):  $D_2 = 65,1 \times 65,1$  мм. Для того чтобы пучки, полученные в результате отражения от первой (передней) и второй (задней) граней пластины PL не накладывались друг на друга, необходимо взять пластину толщиной  $h_{PL} > 28$  мм.

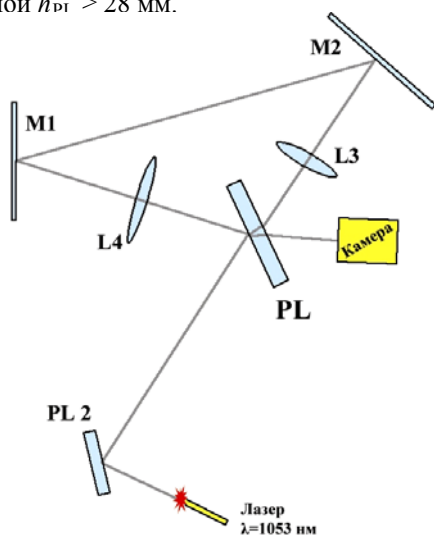


Рис. 2. Схема интерферометра радиального сдвига

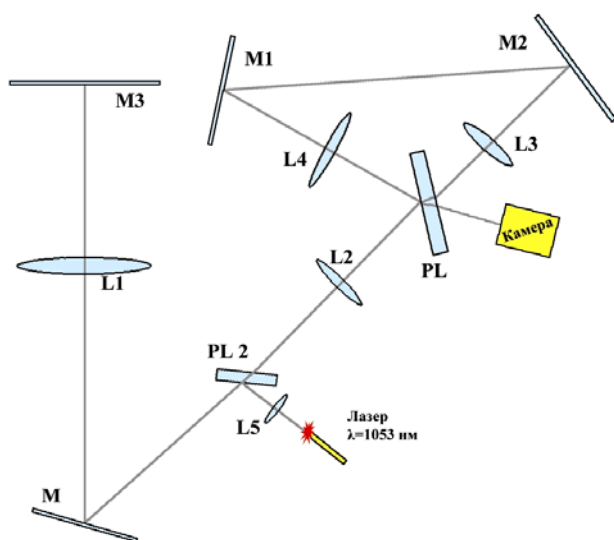


Рис. 3. Схема регистрации интерферограмм

### Численное исследование интерферометра

В разработанном интерферометре пучок в результате прохождения ТС 2 сжимается и растягивается относительно первоначального размера. Проанализируем каждый из образовавшихся ВФ в отдельности.

На вход смоделированного интерферометра подается пучок с волновым фронтом, зарегистрированным на выходе установки «Луч» гартмановским датчиком ( $PV = 1,45$  мкм и  $RMS = 0,23$  мкм). Сжатый пучок (рис. 4а) имеет практически те же значения аберраций. Растянутый пучок (рис. 4б) имеет  $PV = 1,71$  мкм и  $RMS = 0,23$  мкм за счет больших аберраций расширяющего телескопа. Видно, что распределение фазы волнового фронта у пучков прошедших по одной и другой ветки, одинаковое. Различие в том, что один пучок получается сжатым на области  $7,2$  мм, а другой растянутым на области  $65,1$  мм. Но если проанализировать в растянутом пучке только ту область, которая участвует в интерференции, то получится, что растянутый пучок (рис. 4в) имеет  $PV = 0,17$  мкм и  $RMS = 0,03$  мкм.

Следовательно, для растянутого пучка на площади ( $7,2 \times 7,2$  мм), участвующей в интерференции, величина аберраций практически равна нулю. ВФ в таком случае получается практически плоским. Исходя из этого, вытекает одно из преимуществ данного интерферометра, состоящее в том, что падающий сжатый пучок интерферирует с гладким плоским ВФ, т. е. в одном плече построенного интерферометра имеется квазиэталонный ВФ.

Данный интерферометр имеет равную длину оптических путей интерферирующих пучков и следовательно может работать с излучением с малой длиной когерентности. Такой лазер с длиной волны  $1053$  нм и мощностью до  $2$  Вт используется для юстировки оптической системы. Для получения интерференционной картины на излучении второй гармоники неодимового лазера с длиной волны  $527$  нм (или  $532$  нм) требуется небольшое изменение расстояния между линзами.



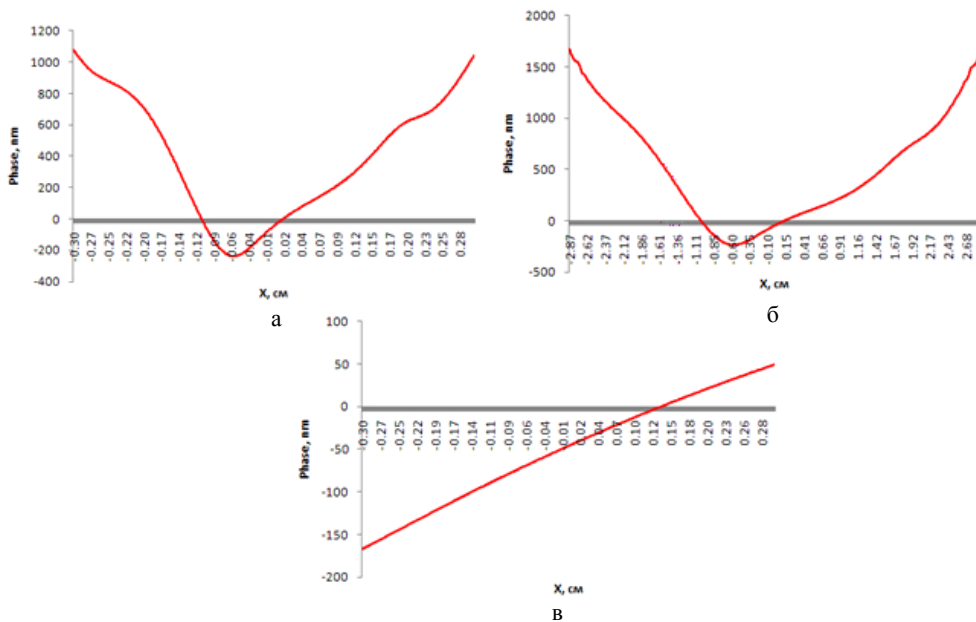


Рис. 4. Распределение фазы ВФ

Величина максимальных искажений волнового фронта, измеряемых данным методом, ограничена  $40\lambda$ . Это связано с тем, что полосы становятся различимыми в том случае, если их ширина равна 10–12 пикселей (1 пиксель = 16 мкм). Что обеспечивает 40 полос на участке  $7,2 \times 7,2$  мм. (Как правило, количество интерференционных полос не превышает 20). При максимальных искажениях ВФ на одну полосу приходится 5 мм регистрируемой области. При надежно фиксируемых искривлениях полосы  $0,1\lambda$  пространственное разрешение составляет 0,5 мм.

### Аттестация схемы регистрации интерферограмм

После сборки и юстировки интерферометра была получена интерференционная картина на юстировочном лазере с длиной волны 1053 нм (рис. 5).

Значение полученных aberrаций:  $PV = 0,52$  мкм;  $RMS = 0,08$  мкм.

В дальнейшем с помощью программы WinFringe мы можем вычитать aberrации, вносимые интерферометром, из значений ВФ излучения зарегистрированных интерферограмм.

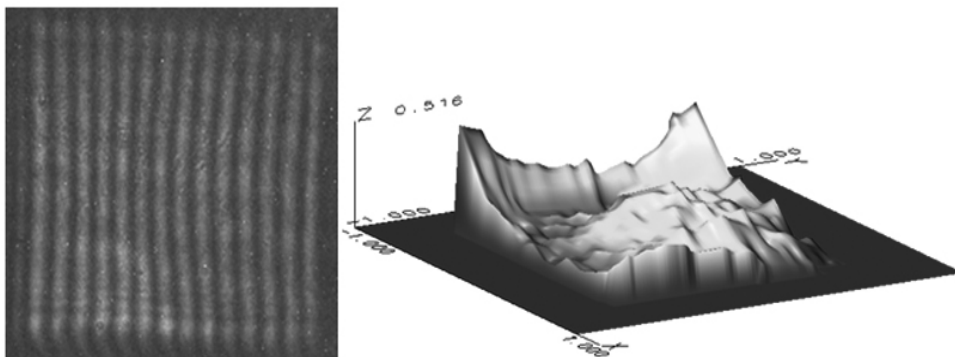


Рис. 5. Интерферограмма и восстановленный ВФ интерферометра на излучении с  $\lambda = 532$  нм

### Определение aberrаций дисковых активных элементов установки «Луч»

С помощью интерферометра радиального сдвига, описанного выше, в автоколлимационном режиме проводилась аттестация отдельных дисковых активных элементов стоящих под углом Брюстера. Измерялся волновой фронт без ДАЭ и с ним, после вычитания получался ВФ отдельного элемента. Прделан контроль десяти элементов, наблюдается соответствие с паспортами завода-изготовителя. Характерный ВФ приведен на рис. 6. Значение полученных aberrаций  $PV = 0,153$  мкм;  $RMS = 0,026$  мкм.

Сравнение полученных aberrаций ДАЭ с данными, предоставленными изготовителями, представлены в табл. 2.

Полученные экспериментальные измерения различаются с паспортными данными максимально на  $0,1\lambda$  микрометра для PV и на  $0,02\lambda$  для RMS, что сравнимо с погрешностью измерения ВФ.

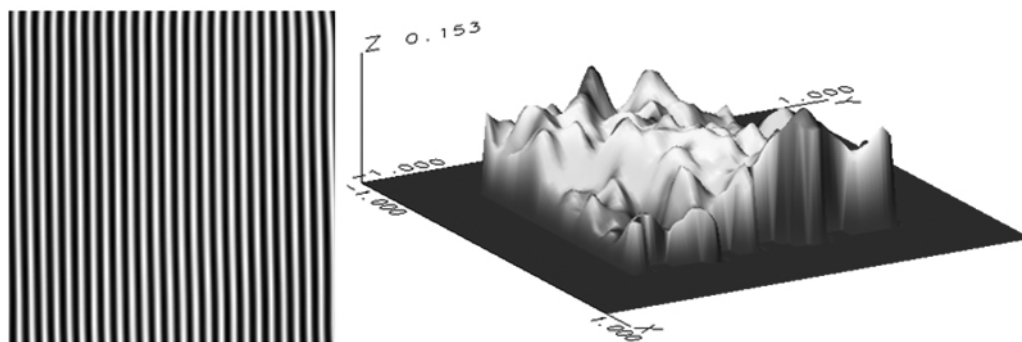


Рис. 6. Интерферограмма и восстановленный ВФ одного ДАЭ

Таблица 2

Сравнение aberrаций ДАЭ

№	97	143	151	184	358	364	365
PV, мкм Экспериментальные/ паспортные	0,272/0,278	0,293/0,242	0,309/0,319	0,336/0,307	0,234/0,222	0,217/0,323	0,265/0,297
RMS, мкм Экспериментальные/ паспортные	0,046/0,061	0,046/0,039	0,054/0,057	0,06/0,062	0,038/0,028	0,034/0,046	0,043/0,047

Для снижения влияния погрешности измерения aberrаций ДАЭ следует проводить контроль всего усилителя в сборе. Разработанный интерферометр позволяет проводить подобные исследования. При этом может осуществляться минимизация искажений ВФ.

Измерен волновой фронт на входе усилителя У1, состоящего из 9 ДАЭ, и после него (рис. 7). После вычитания фронтов получены значения aberrаций (PV = 0,75 мкм; RMS = 0,11 мкм), вносимых усилителем. Расходимость излучения (по уровню энергии 80 %):  $3,5 \cdot 10^{-5}$  рад.

Aberrации целого усилителя превышают искажения одного ДАЭ в 3–4 раза. Дело в том, что максимумы и минимумы фронтов отдельных элементов расположены случайным образом, происходит их компенсация и усреднение.

Для подтверждения взаимной частичной компенсации возьмем девять ДАЭ (табл. 3) с известными aberrациями и сложим их волновые фронты (смоделируем усилитель). Из полученных результатов видно, что сумма aberrаций девяти ДАЭ почти совпадает с экспериментально полученными результатами.

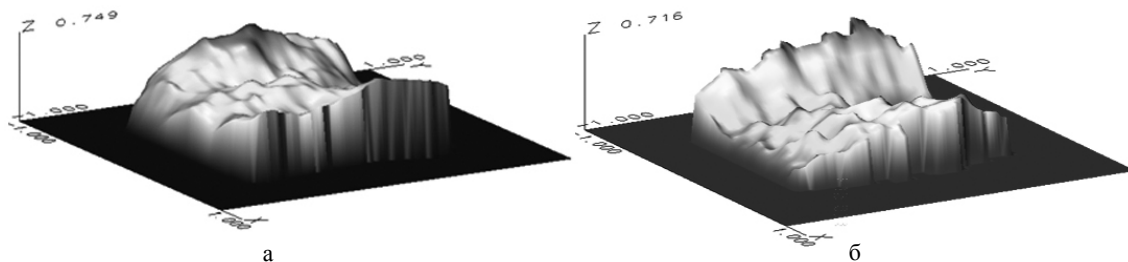


Рис. 7. Восстановленный ВФ усилителя 1(а) и ВФ смоделированного усилителя (б)

Таблица 3

Aberrации девяти ДАЭ и сумма их ВФ

№	97	143	151	184	351	358	364	365	371	Σ ВФ
PV, мкм	0,272	0,293	0,309	0,336	0,257	0,234	0,217	0,265	0,153	0,16
RMS, мкм	0,046	0,046	0,054	0,06	0,067	0,038	0,034	0,43	0,026	0,128



То же происходит и при прохождении излучения по двум усилителям в четырехпроходной схеме. Выравнивающий эффект усиливается наклонным ходом излучения через усилители, не совпадающем в различных проходах. Тем не менее, aberrации ВФ на выходе оптической системы достигают  $3\lambda$ . Крупномасштабные искажения ВФ компенсируются адаптивным зеркалом.

### **Заключение**

Для исследования качества оптических элементов установки «Луч» разработан интерферометр радиального сдвига. По результатам численного моделирования интерферометра определены его конструктивные параметры с минимальными aberrациями. Измерены значения aberrаций оптической системы интерферометра. Отработана методика контроля дисковых активных элементов. Получено согласие результатов проведенных измерений с данными, измеренными

другими схемами. Смоделирован усилитель и определены его aberrации. Проведено сравнение aberrаций смоделированного усилителя и искажений, вносимых первым усилителем лазерной установки «Луч».

### **Литература**

1. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка «Луч» – модуль установки «ИСКРА-6» // Доклад. IV Харитоновские научные чтения. Сборник аннотаций. С. 82. Саров, 2002.
2. Воронина Н. В., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Расчетно-экспериментальная оптимизация пространственных характеристик лазерного излучения установки «Луч» // Прикладная физика. № 6, 2006. С. 50–63.
3. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Л. В. Жабька, А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время является актуальным знание границы сохранения функциональных свойств конструкционных материалов при высокоинтенсивном импульсном воздействии. Как правило, высокоинтенсивное импульсное воздействие приводит к явлению динамического разрушения, в результате которого возникают диссипативные структуры (ДС). Ранее было показано, что сопротивление внешнему воздействию оказывают возникающие в разрушенном теле ДС, например, каскад центров разрушения, количественные характеристики которых определяют статистическую картину процесса динамического разрушения [1–3].

Исследование возникновения микроповреждений в явлении динамического разрушения под действием коротко-импульсных нагрузок большой интенсивности в настоящее время является актуальным. Для этого разрабатываются различные феноменологические модели, применимость которых ограничена условиями ударно-волновых воздействий в определенном диапазоне рассматриваемых нагрузок. Исследование поведения металлов в экстремальных условиях возможно на примере изучения процесса динамического разрушения при воздействии мощных импульсов проникающих излучений [1–4].

Проведенные ранее исследования показали [1, 2], что при больших степенях отклонения от равновесия и необратимых изменениях плотность различных дефектов кристаллической структуры может достигать критических значений, когда начинают проявляться коллективные эффекты в поведении дефектов. В работе [5] показано, что связь в ансамбле одного структурного уровня дефектов дает предпосылку для автолокализованного образования другого структурного уровня, выполняющего роль исходного структурного уровня для более высокого, т. е. возникают эффекты самоорганизации с большим радиусом корреляции. В таких средах не выполняется условие макроскопической причинности, поскольку масштабы изменения макроскопических переменных не превышают масштабы корреляций микроскопических переменных [1, 2].

В работе представлена иерархическая модель динамического разрушения, основанная на обширном экспериментальном материале, математическом формализме теории перколяции, фрактальной геометрии. В рамках модели показано, что неравновесная система эволюционирует путем перехода с одного структурного уровня на другой, концентрационный критерий выступает как один из основных параметров, характеризующих неравновесный динамический процесс.

Известно, что временные закономерности процесса динамического разрушения металлов обусловлены иерархическими свойствами ДС – каскада центров разрушения, определяющих процесс динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с [3]. Формирование ДС возможно только при совместной реализации нескольких структурных уровней, а их фрактальная размерность является количественной характеристикой [2, 3].

Анализ современных литературных данных показывает, что в настоящее время отсутствуют физические модели, которые используют концепцию иерархии структурных уровней, методы нелинейной физики, математический аппарат теории критических явлений, теории перколяции для решения задачи описания динамического разрушения металлов, например, в режиме импульсного объемного разогрева [1–3, 5, 6].

Ранее [1–3] был установлен динамический инвариант, связывающий параметры внешнего воздействия – давления  $P(t)$  с энергетическими параметрами кристаллической решетки:  $H$  – энтальпией и  $L_m$  – скрытой теплотой плавления. Динамический инвариант  $I(P, t) = P(t)/\Gamma\rho(H + L_m)$  имеет близкие значения для ряда исследованных металлов в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с ( $\Gamma$  – параметр Грюнайзена,  $\rho$  – плотность металла) [2, 3, 5, 6].

Это свидетельствует о том, что для определенного значения критического давления  $P(t)$  для каждого металла при определенном значении долговечности  $t$  временные зависимости числа центров разрушения  $N(P, t)$  и скорости центрообразования  $J(P, t)$ , определяющих кинетику процесса разрушения, имеют близкие значения.

Ранее [2, 3, 5] было получено спектральное распределение центров разрушения по размерам, которое имеет вид

$$N_i(D_i) \approx D_i^{-\alpha}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – число центров разрушения размера  $D_i$ ,  $\alpha$  – фрактальная размерность.

Каскад центров разрушения является самоподобным кластером, когда размеры  $D$  центров разрушения образуют геометрическую прогрессию

$$D_i = qD_{i-1} = q^i L, \quad (2)$$

где  $L$  – размер области, занимаемой центрами разрушения; параметр  $q < 1$ .

Результаты исследований, проведенных ранее (см. работы авторов [1–5]), показали, что процесс накопления центров разрушения в различных металлах в явлении динамического разрушения (диапазон долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с), процесс накопления трещин в различных твердых телах (полимерах, металлах, кристаллах, стеклах, горных породах) под нагрузкой определяются соотношением [1–3]

$$\frac{\bar{D}}{r} = \frac{\bar{D}}{N(D)^{-1/3}} = \frac{1}{2,7}, \quad (3)$$

когда центры разрушения, трещины начинают укрупняться (т. е. когда концентрация, например, центров разрушения достигает значения  $\sim 5\%$ ), где  $r$  – среднее расстояние между центрами разрушения,  $\bar{D}$  – средний размер центров разрушения.

На рис. 1 приведены результаты обработки шлифов образцов из меди, бронзы, железа после воздействия РЭП (центры разрушения – микроуровень разрушения) [3, 5] и образцов из меди под влиянием растягивающих напряжений (шероховатость поверхности разрушения – наноуровень разрушения) [4]. Данные, приведенные на рис. 1, показывают выполнение концентрационного критерия для ДС на различных структурных уровнях.

Каскад центров разрушения на пороге макро-разрушения, когда происходит топологический фазовый переход – возникновение связности в системе центров разрушения, является перколяционным кластером. Универсальное поведение металлов в явлении динамического разрушения определяет возможность применения аппарата теории критических явлений [7, 8] к количественному описанию процесса и позволяет прогнозировать поведение неисследованных материалов в широких температурно-временных диапазонах [2, 3, 6] (диапазон долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с; диапазон начальных температур  $T_0 \sim 4K \div 0,8T_{пл}$ ).

На основе экспериментального материала [5] найден алгебраический вид функции центрообразования  $J(P, t)$ , который определяет временную границу сохранения функциональных свойств конструкционных материалов в процессе динамического разрушения металлов.

Данные фрактографических исследований шлифов ряда металлов показывают, что функции скорости центрообразования имеют подобный вид [2, 3, 5]. Это позволяет построить график функции скорости центрообразования  $J(t)$  в координатах  $t/t_p$ ,  $J/J_p$  ( $t_p$  – долговечность,  $t$  – текущее время,  $J_p$  – максимальное значение скорости центрообразования) для различных металлов в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с.

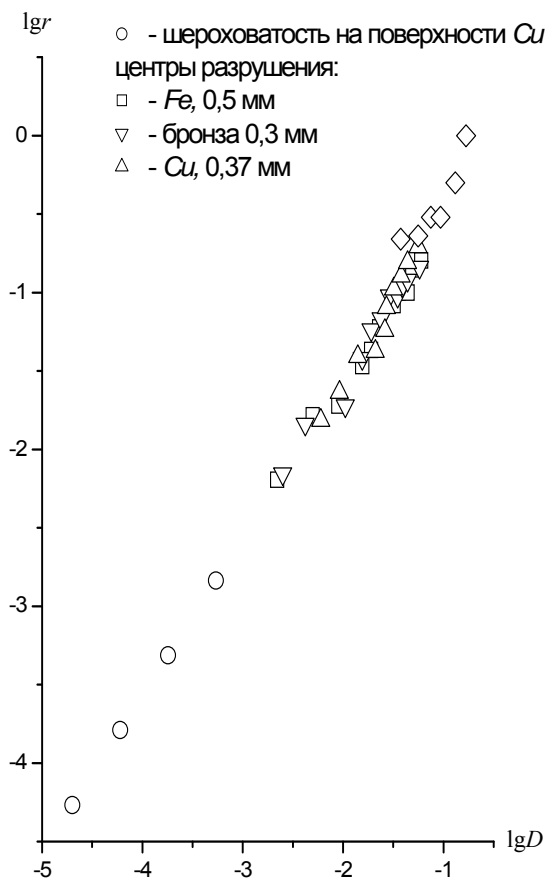


Рис. 1. Концентрационный критерий ( $[r]$ ,  $[D]$  – в мм)

Приведенные на рис. 2 данные аппроксимировались для получения алгебраического вида функции скорости центрообразования  $J(t)$  для различных металлов. На начальной стадии разрушения, когда плотность центров разрушения мала, и они не взаимодействуют, кинетику  $J(t)$  можно представить ослабленной экспонентой [9]. Вид функции  $J(t)$  подобен виду функций, описывающих режимы с обострением, либо поведение системы вблизи критической точки [9].

$$J(t) \approx A \exp(t/B)^\lambda (1-t)^\beta, \quad (4)$$

где  $\lambda$ ,  $\eta$  – степенные показатели;  $A$ ,  $B$  – константы.

Экспоненциальный множитель с  $\lambda < 1$  (см. выражение 4) описывает начальную стадию процесса центрообразования, когда плотность центров разрушения мала, их взаимодействием можно пренебречь. Степенной множитель описывает заключительную стадию процесса центрообразования, когда возникает взаимодействие между центрами разрушения, и их каскад растет как самоподобный объект. В этом случае возникает зависимость среднего расстояния между центрами разрушения от их размера  $D$  (см. рис. 1) [2, 3, 5].

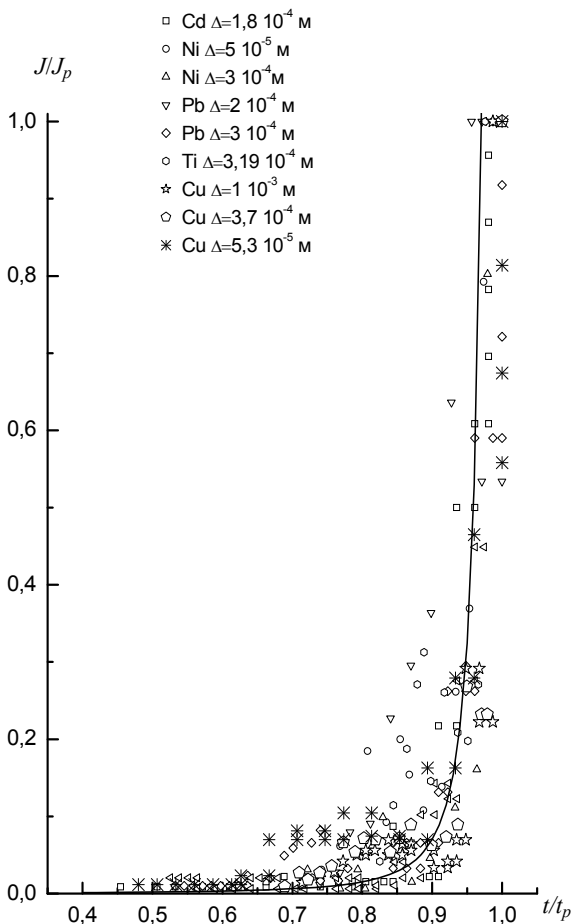


Рис. 2. Скорость центрообразования в координатах  $t/t_p$ ,  $J/J_p$  [2]

В результате аппроксимаций получено соотношение для скорости центрообразования

$$J_H(t) = 0,0003 \exp\left(\frac{t_H}{100}\right)^{0,2} (1-t_H)^{-2,2}, \quad (5)$$

где  $J_H(t) = J(t)/J_{\max}$ ,  $t_H = t/t_p$ .

Для введения иерархической модели динамического разрушения металлов в многомерные математические коды получены следующие соотношения, выраженные через динамический инвариант  $I$ .

Временную зависимость числа центров разрушения можно представить в виде:

$$N(P, t) = B_1 \exp\left(\frac{t/t_p}{B_2}\right)^{0,4} (1-t/t_p)^{-1,2}, \quad (6)$$

где  $t_p$  – время разрушения;  $B_1$ ,  $B_2$  – коэффициенты ( $B_1 < 1$ ,  $B_2 > 1$ ).

Для введения в математические коды функции скорости центрообразования  $J(P, t)$ , зависящей от времени, необходимо найти соотношения для  $t_p(P)$ ,  $J_{tot}(P)$ ,  $J(P, t)$ .

Выражение для  $J(P, t)$  представлено в виде

$$J(P, t) = J_{tot}(t_p) \exp(t/t_p)^{0,2} (1-t/t_p)^{-2,2}, \quad (7)$$

где  $J_{tot}(P, t)$  можно представить выражением:

$$\lg J_{tot}(P, t) = a_0 + a_1 I(t_p) + a_2 I^2(t_p), \quad (8)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты; инвариант  $I$  имеет вид  $I(t_p) = P(t)/\Gamma p(H + L_m)$  [2, 3, 5, 6].

Время разрушения  $t_p$ , выраженное через инвариант  $I(t_p)$ , имеет вид

$$\lg t_p = b_0 + b_1 I(t_p) + b_2 I^2(t_p) + b_3 I^3(t_p) + b_4 I^4(t_p), \quad (9)$$

где  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  – коэффициенты.

С учетом выражений (7) и (8) получаем

$$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{tI(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{tI(t_p)}{A}\right)^{-2,2}, \quad (10)$$

где  $A$  – const.

Нормированная на масштабе времени разрушения скорость центрообразования имеет вид

$$J(t) = C_1 \exp\left(\frac{t/t_p}{C_2}\right)^{0,2} (1-t/t_p)^{-2,2}, \quad (11)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – const;  $C_1 < 1$ ,  $C_2 > 1$ .

С помощью полученных выражений по расчетной методике ТИМ2D были описаны опыты:

1. Клиновые образцы двух типов из железа нагружались нормальной (а) и скользящей (б) детонацией слоев ВВ различной мощности и толщины (ударно-волновое нагружение) [10].

2. Образцы из меди подвергались воздействию импульсов релятивистских электронных пучков [5].

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными (время разрушения экспериментальное и время разрушения расчетное – совпадают).

В предложенной иерархической модели разрушения установлена временная зависимость критического давления, приводящего к разрушению, что позволило выразить в определенной математической форме ряд кинетических процессов, определяющих протекание процесса динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности  $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с.

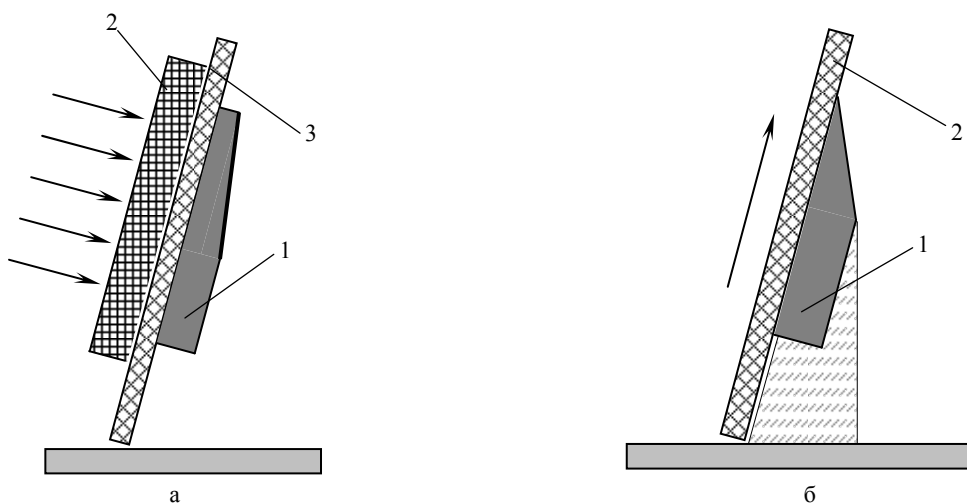


Рис. 3. Схемы экспериментов: 1 – образец, 2 – слой ВВ, 3 – крышка-экран

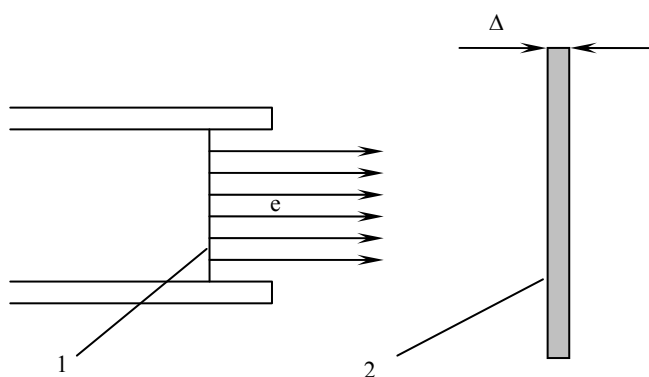


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – выходное окно ускорителя, 2 – образец

Найденное соотношение для скорости центрообразования позволяет включить кинетику процесса динамического разрушения в многомерные математические коды, выполняемые на ЭВМ, иерархической модели динамического разрушения, которая позволяет адекватно описывать поведение металлов в экстремальных условиях.

## Литература

1. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Платонова Л. А. и др. Обзор результатов исследования природы процесса динамического разрушения. Высокие плотности энергии: Сборник научных трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. С. 368–383.
2. Илькаев Р. И., Учаев А. Я., Новиков С. А., Завада Н. И. и др. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. 2002. Т. 384, № 3. С. 328–333.
3. Илькаев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Новиков С. А. и др. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН. 2003. Т. 393, № 3.

4. Килиан Х. Г., Веттегрень В. И., Светлов В. Н. Иерархия ансамблей дефектов на поверхности нагруженной меди // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 2107–2111.

5. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Учаев А. Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Научное издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 275.

6. Учаев А. Я., Завада Н. И., Илькаев Р. И., Кошелева Е. В. и др. Инварианты в явлении динамического разрушения металлов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. Вып. 3. С. 304–313.

7. Паташинский А. З., Покровский В. Л. Флуктуационная теория фазовых переходов: 2-е изд., перераб. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. С. 382.

8. Фишер М. Е. Природа критического состояния: Пер. с англ. М. Ш. Гитермана. М.: «МИР», 1986. С. 168.

9. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления. М., 1973. С. 402.

10. Козлов Е. А. Характеристики откольной прочности сплава U – 1,5 % Мо при взрывном нагружении различной интенсивности // Деформация и разрушение материалов. 2009, № 10. С. 10–18.

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АБЕРРАЦИИ СВЕТА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. Н. Климов, А. Ф. Шкана, Д. В. Филиппов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Лазерная локация космических аппаратов (КА) позволяет с большой точностью определять их координаты и уточнять параметры орбит. Повысить эффективность лазерной локации можно уменьшением расходимости подсвечивающего лазерного излучения и постановкой на КА высококачественных ретрорефлекторов для повышения уровня отраженного сигнала. Явление абберации света, открытое Брэдли в 18 в. [1] обуславливает погрешность в направлении зондирующего излучения при лазерной локации КА. Если расходимость лазерного излучения сравнима с углом абберации света, необходимо вводить поправку на направление подсвечивающего лазерного излучения (угол упреждения). Также, если расходимость отраженного от КА излучения сравнима с углом абберации света, возможно непопадание этого излучения в приемную апертуру фоторегистратора. В соответствии с классической теорией, а также на основании преобразований Лоренца, проведен теоретический анализ и получены соотношения, определяющие абберацию света при лазерной локации космических аппаратов. Определено угловое смещение принимаемого пучка лазерного излучения при его отражении от зеркала и призмленного отражателя, размещенных на космическом аппарате.

## Расчет угла абберации и углового смещения принимаемого пучка на основании преобразований Лоренца

Даная задача аналогична задачи преобразования световых пучков при их распространении и переходе от неподвижной к подвижной системе координат. В соответствии с [2] такое преобразование позволяет полностью исследовать картину происходящих явлений на основании преобразований Лоренца [3].

Рассмотрим две системы координат  $K$  и  $K'$  с взаимно-параллельными осями. Система  $K$  – неподвижная, связанная с поверхностью Земли, причем ось  $OX$  расположена в плоскости местного горизонта. Система  $K'$  связана с движущимся со скоростью  $u$  относительно  $K$  объектом, направление оси  $OX'$  совпадает с направлением вектора скорости  $u$ . Пусть лазерный излучатель (локатор), расположенный на поверхности Земли, светит в направлении объекта под углом  $\varphi$

к оси  $OX$  (рис. 1). За положительное направление изменения угла  $\varphi$  примем вращение луча против часовой стрелки.

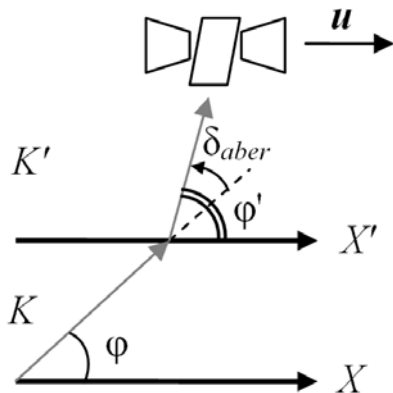


Рис. 1. Изменение направления лазерного пучка при переходе от неподвижной ( $K$ ) к движущейся ( $K'$ ) системе координат

Проекция скорости лазерного пучка на ось  $OX$  будет равна

$$v_x = c \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света.

Соответственно, в системе координат  $K'$  будем иметь

$$v'_{x'} = c \cos \varphi', \quad (2)$$

где  $v'_{x'}$  – проекция скорости лазерного пучка на ось  $OX'$ ,  $\varphi'$  – угол наклона лазерного пучка относительно оси  $OX'$ .

Проекции скоростей лазерного пучка  $v_x$  и  $v'_{x'}$  в теории относительности связаны преобразованием Лоренца [3]:

$$v'_{x'} = \frac{v_x - u}{1 - \frac{v_x u}{c^2}}. \quad (3)$$

С учетом (1) и (2) из (3) имеем:

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{u}{c}}{1 - \frac{u}{c} \cos \varphi}. \quad (4)$$

В предположении  $\frac{u}{c} \ll 1$  (для скоростей КА, меньших второй космической скорости равной 11,2 км/с, величина  $\frac{u}{c} < 3,73 \cdot 10^{-5}$ ) из (4) получаем связь направлений лазерного пучка в неподвижной и движущейся системах координат

$$\varphi' = \varphi + \frac{u}{c} \sin \varphi = \varphi + \delta_{aber}, \quad (5)$$

где

$$\delta_{aber} = \frac{u}{c} \sin \varphi. \quad (6)$$

Это известное в теории относительности соотношение [4] объясняет открытое Бредли в 18 веке явление аберрации света [1], заключающееся в том, что наблюдатель, движущийся вместе с системой  $K'$ , видит источник света, смещенный по сравнению с направлением на источник в системе  $K$  к апексу движения [5] на угол  $\delta_{aber}$ . Из (6) следует, что угол аберрации  $\delta_{aber}$  зависит только от скорости  $u$  движения КА по орбите и от направления  $\varphi$  локатора на цель КА. Положительный знак  $\delta_{aber}$  свидетельствует о том, что при прямом переходе (от  $K$  к  $K'$ ) лазерный пучок поворачивается в положительном направлении относительно первоначально, т. е. против часовой стрелки (рис. 1).

Рассмотрим два варианта отражателей КА: вариант 1 – ретрорефлектор (рис. 2); вариант 2 – плоское зеркало, ориентированное под углом  $\alpha$  относительно горизонта (рис. 3).

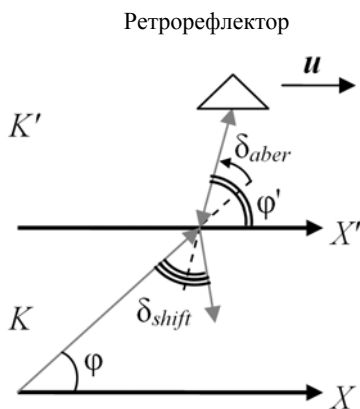


Рис. 2. Изменение направления отраженного лазерного пучка в системе  $K$  при его отражении от ретрорефлектора

При отражении от ретрорефлектора направление отраженного пучка в системе  $K'$  относительно оси  $OX'$  (или  $OX$ ) будет определяться углом

$$\varphi'_{ref} = \varphi' + \pi. \quad (7)$$

Для определения направления отраженного пучка  $\varphi_{ref}$  в системе координат  $K$  выполним переход из  $K'$  в  $K$ , воспользовавшись соотношением (5). Здесь надо

учесть, что система  $K$  относительно системы  $K'$  движется в противоположную сторону, поэтому значение скорости в (5) надо брать с обратным знаком

$$\varphi_{ref} = \varphi'_{ref} - \frac{u}{c} \sin(\varphi'_{ref}). \quad (8)$$

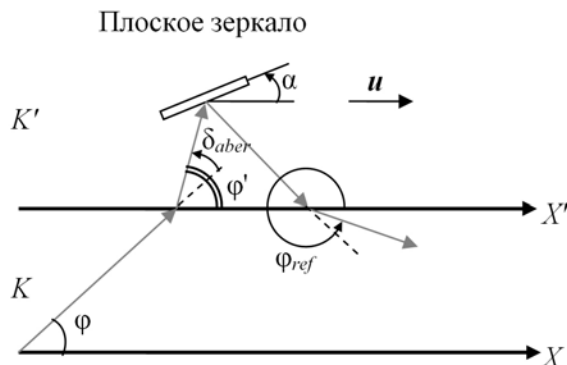


Рис. 3. Изменение направления отраженного лазерного пучка в системе  $K$  при его отражении от плоского зеркала, ориентированного под углом  $\alpha$  к горизонту

Подставляя (7) в (8), и учитывая, что  $\varphi' = \varphi$  с точностью порядка  $\frac{u}{c}$ , получим:

$$\varphi_{ref} = (\varphi + \pi) + \frac{2u}{c} \sin \varphi. \quad (9)$$

Поскольку значение угла  $(\varphi + \pi)$  определяет направление отраженного лазерного пучка от неподвижного ретрорефлектора, то, как видно из (9), движение ретроотражающего объекта со скоростью  $u$  приводит к изменению направления (угловому смещению) отраженного пучка в системе  $K$  относительно обратного направления на величину

$$\delta_{shift} = \varphi_{ref} - (\varphi + \pi) = \frac{2u}{c} \sin \varphi. \quad (10)$$

Поскольку конкретный вид ретрорефлектора не рассматривался, полученное соотношение (10) верно как для угловых отражателей с двумя или тремя взаимно ортогональными гранями, так и для отражателя типа «кошачий глаз» – линза (объектив) с расположенным в фокальной плоскости зеркалом.

Рассмотрим теперь в качестве отражателя КА плоское зеркало, ориентированное под углом  $\alpha$  к горизонту. Направление отраженного пучка в системе координат  $K'$  относительно оси  $OX'$  будет определяться углом

$$\varphi'_{ref} = 2\pi - (\varphi' - 2\alpha). \quad (11)$$

Теперь, для определения направления отраженного пучка в неподвижной системе координат  $K$  выполним переход из  $K'$  в  $K$ , воспользовавшись соотношениями (8), (11) и (5).



$$\varphi_{ref} = 2\pi - \left( \varphi + \frac{u}{c} \sin \varphi \right) + 2\alpha - \frac{u}{c} \sin \left( 2\pi - \left( \varphi + \frac{u}{c} \sin \varphi \right) + 2\alpha \right). \quad (12)$$

Из (12) с точностью порядка  $\frac{u}{c}$  имеем:

$$\begin{aligned} \delta_{shift} &= \varphi_{ref} - (2\pi - (\varphi - 2\alpha)) = \\ &= -\frac{u}{c} (\sin \varphi - \sin(\varphi - 2\alpha)). \end{aligned} \quad (13)$$

Если зеркало расположено горизонтально ( $\alpha = 0$ ), то выражение (13) обращается в ноль и отраженный пучок в системе К не меняет своего направления. Если же зеркало ориентировано так, что выполняется условие:

$$\alpha = \varphi' - \frac{\pi}{2}, \quad (14)$$

то (13) совпадает с (10). В этом случае отражение от плоского зеркала эквивалентно отражению от ретрорефлектора.

Данный анализ показывает, что эффект скоростной абберации света имеет место при отражении лазерного пучка от ретрорефлектора, установленного на КА. Авторами работы [6] допущен ряд ошибок, который привел их к неверному результату. Пучок после отражения от ретрорефлектора, движущегося со скоростью  $u$ , уже не вернется строго назад в системе  $K$ , а отклонится на угол  $2\frac{u}{c} \sin \varphi$ .

### Расчет углового смещения принимаемого пучка в соответствии с классическим рассмотрением задачи

На рис. 4 представлен призмный ретрорефлектор выполненный в виде тетраэдрического отражателя с показателем преломления среды  $n$ , движущийся слева на право со скоростью  $u$ . Рассмотрим отражение от него света, падающего нормально на основании призмы.

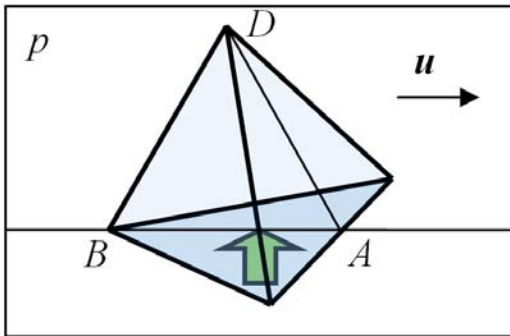


Рис. 4. Призмный ретрорефлектор, выполненный в виде тетраэдрического отражателя

На рис. 5 представлен ход лучей внутри такого ретрорефлектора в плоскости  $p$ , проходящей через ребро AD и середину противоположной грани.

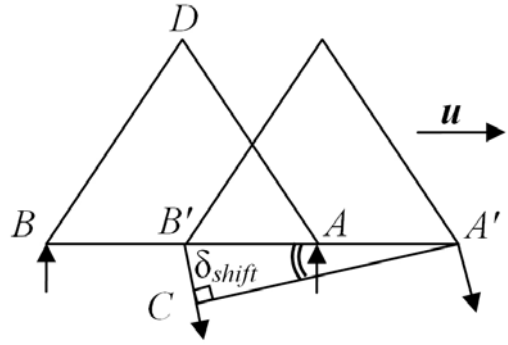


Рис. 5. Ход лучей при отражении от призмного ретрорефлектора

Два параллельных луча, попавших внутрь призмы в точках  $A$  и  $B$ , распространяются навстречу друг другу. Из  $A$  луч идет против движения отражателя и в  $B'$  выходит из него, встретив пришедшую сюда отражающую грань. Из  $B$  луч идет по направлению движения отражателя и выходит из него в  $A'$ .

Определим угловое смещение  $\delta_{shift}$  (рис. 5) лучей, вышедших из призмы, относительно лучей падающих на нее. Для этого, рассмотрим время распространения излучения в материале призмы. Для лучей, ортогональных направлению движения призмы, никакой разницы в скорости, а значит и во времени распространения при одной длине волны, не будет. Иначе обстоит дело с лучами, после отражения от боковых граней идущими вдоль входной грани призмы.

Пусть  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – время распространения света внутри призмы с учетом скоростей  $v_1$  и  $v_2$  в материале призмы на расстояния  $BA'$  и  $AB'$  соответственно.

$$\Delta t_1 = \frac{BA'}{v_1}, \quad (15)$$

$$\Delta t_2 = \frac{AB'}{v_2}. \quad (16)$$

Отрезки  $BA'$  и  $AB'$  равны:

$$BA' = AB + AA', \quad (17)$$

$$AB' = AB - AA', \quad (18)$$

где  $AA'$  – расстояние, которое пройдет призма до выхода луча из точки  $A'$ .

$$AA' \approx \frac{u}{c/n} AB, \quad (19)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Из [7] следует:

$$v_1 \approx \frac{c}{n} + u \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), \quad (20)$$

$$v_2 \approx \frac{c}{n} - u \left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \quad (21)$$

Подставляя (20) и (21) в (15), (16) с учетом равенств (17) и (18), получим следующие значения для  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ :

$$\Delta t_1 \approx \frac{AB}{c/n} \left(1 + \frac{u}{cn}\right), \quad (22)$$

$$\Delta t_2 \approx \frac{AB}{c/n} \left(1 - \frac{u}{cn}\right). \quad (23)$$

Из треугольника  $\Delta A'B'C$  находим

$$\sin \delta_{shift} = \frac{B'C}{A'B'} = \frac{B'C}{AB}, \quad (24)$$

где  $B'C$  – путь в вакууме вошедшего в  $A$  и вышедшего в  $B'$  луча за время, пока луч, вошедший в  $B$  продолжает распространяться до  $A'$ .

$$B'C = c(\Delta t_1 - \Delta t_2). \quad (25)$$

Из (24) с учетом (25) и (22), (23) с точностью порядка  $\frac{u}{c}$  имеем:

$$\delta_{shift} \approx 2 \frac{u}{c}. \quad (26)$$

Данный анализ показывает, что угловое смещение  $\delta_{shift}$  лучей, вышедших из призмы, относительно лучей падающих на нее не зависит от материала призмы  $n$ . Авторами работы [8] допущен ряд ошибок, который привел их к неверному результату.

## Заключение

Направление распространения отраженного от движущегося ретрорефлектора лазерного пучка определяется с помощью формулы преобразования скоро-

стей Лоренца. Угловое смещение принимаемого пучка лазерного излучения при его отражении от ретрорефлектора равно  $\delta_{shift} = \frac{2u}{c} \sin \varphi$ . Такой же результат был получен в соответствии с классическим рассмотрением задачи.

Получено выражение для направления распространения лазерного пучка, отраженного от движущегося зеркала. Угловое смещение отраженного пучка зависит от наклона зеркала, при горизонтальном расположении зеркала угловое смещение отраженного пучка отсутствует.

## Литература

1. Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972.
2. Эйнштейн А. Теория относительности: Избранные труды. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2000.
3. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
4. Бергман П. Г. Введение в теорию относительности. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1947.
5. Физическая энциклопедия в 5-ти томах. М.: Советская энциклопедия, 1988.
6. Кочкин В. А., Кутаев Ю. Ф., Манкевич С. К. Влияние скоростной абберации света на структуру отраженного сигнала при лазерной локации космических аппаратов // Лазерно-оптические системы и технологии. Юбилейный научно-технический сборник ФГУП НПО Астрофизика. 2009. С. 110–113.
7. Ладсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976.
8. Васильев В. П., Гришмановский В. А., Плиев Л. Ф., Старцев Т. П. О влиянии движения оптической среды при локации // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 55. Вып. 6. С. 317–320.

# РЕЛАКСАЦИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФРУСТРИРОВАННЫХ СПИН-ЦЕПОЧЕЧНЫХ СИСТЕМ: $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$

А. С. Коршунов, Ю. Б. Кудасов, Д. А. Маслов, В. Н. Павлов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Уменьшение размерности и фрустрации приводят к сложным физическим явлениям в магнитных соединениях, к изменению их транспортных и магнитных свойств. Внимание исследователей привлекают несколько хорошо известных групп квазиодномерных магнитных соединений, в которых треугольная решетка сформирована или из антиферромагнитно (АФМ) упорядоченных изинговских спиновых цепочек, например в  $\text{CsCoCl}_3$ ,  $\text{CsCoBr}_3$  0, или же упорядоченных ферромагнитно (ФМ), как в случае  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  [2, 3]. Существуют структуры и с более сложным упорядочением, к примеру, недавно открытое соединение  $\text{Sr}_5\text{Rh}_4\text{O}_{12}$  [4] имеет магнитную структуру цепочек, которая в первом приближении может рассматриваться как ферромагнитная.

Один из хорошо известных примеров из данного «семейства» квазиодномерных соединений –  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  [3, 5–15, 17, 18]. Его кристаллическая структура имеет ромбоэдрическую структуру  $R\bar{3}c$ , состоящую из цепочек  $\text{Co}_2\text{O}_6$ , идущих вдоль оси с гексагональной ячейки и разделенных катионами Са. Цепочки состоят из чередующихся тригональных призм  $\text{CoO}_6$  с общими гранями и октаэдров  $\text{CoO}_6$ . Кристаллическое электрическое поле расщепляет энергетические уровни ионов  $\text{Co}^{3+}$  на высокоспиновое ( $S = 2$ ) и низкоспиновое ( $S = 0$ ) состояния. В свою очередь каждая цепочка в плоскости окружена шестью равноудаленными цепочками, формируя треугольную решетку в плоскости  $ab$ , перпендикулярной оси  $c$ . В то же время, каждая из цепочек принадлежит одной из 3-х подрешеток, которые сдвинуты друг относительно друга на  $1/3$  размера элементарной ячейки по оси  $c$ . ФМ взаимодействие внутри цепочек (вдоль оси  $c$ ) является гораздо более сильным, чем АФМ взаимодействие между ними (в плоскости  $ab$ ). Стоит заметить, что топология магнитной сетки в  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  довольно сложна и включает в себя спиральные пути.

Кривая намагниченности в  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  имеет ступенчатый вид, чем привлекает значительный интерес ученых. Количество ступеней на кривой определяется как скоростью нарастания магнитного поля, так и температурой [3, 8, 10]. В температурном диапазоне от 12 до 24 К наблюдаются только две [10], а при температурах ниже 12 К и умеренных скоростях нарастания магнитного поля – четыре эквидистантных ступени [3, 8]. При малых скоростях нарастания поля форма кривой намагниченности приближается к двухступенчатому виду, характерному для высоких

температур [8]. Экспериментальное исследование кривых намагниченности  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  в переменных магнитных полях при различных температурах было представлено в работе [7].

К теоретическим исследованиям можно отнести расчет кривой намагниченности  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  методом Монте – Карло с использованием стандартного алгоритма Метрополис [16]. С помощью данного метода были получены четыре ступени на кривой намагниченности на разупорядоченной 2D и на идеальной 3D решетках. Однако недавние расчеты Монте – Карло по алгоритму Ванга – Ландау показали, что для равновесного состояния жестких цепочек на 2D решетке характерно наличие только двух ступеней на кривой намагниченности [17]. Результаты наших предыдущих работ [5, 6, 14, 15] так же хорошо согласуются с алгоритмом Ванга – Ландау.

В наших недавних работах мы выполнили численные расчеты эволюции намагниченности для 2D треугольной решетки в ромбической суперячейке  $96 \times 96$  с периодическими граничными условиями [14], и 3D кластера с треугольной решеткой размером  $24 \times 24 \times 36$ . Хотелось бы заметить, что в нашей трехмерной модели, в отличие от статьи [16], магнитные ионы кобальта не лежат в одной плоскости, т. е. цепочки в трех подрешетках сдвинуты друг относительно друга вдоль оси  $c$  на  $1/3$  от размера элементарной ячейки, как и в реальной структуре  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ . В плоскости  $ab$  цепочки образовывали ромбическую треугольную решетку с периодическими граничными условиями. Вдоль оси  $c$  не было периодических условий, т. е. цепочки имели свободные концы. Эти модели позволили описать ступенчатое поведение кривой намагниченности при низких температурах и хорошо согласовывались с экспериментальными данными. Однако, они основывались на некоторых предположениях. В частности, мы предположили, что цепочки взаимодействуют только с ближайшими соседями и тепловым резервуаром. Вероятность переворота  $i$ -го спина в цепочке в единицу времени для 3D модели может быть записана в глауберовской форме [18]

$$W_i = \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - \sigma_i \tanh \left( \frac{J_1 S^2}{kT} \sum_{il} \sigma_l + \frac{J_2 S^2}{kT} \sum_{ij} \sigma_j + \frac{\mu B}{kT} \right) \right],$$

где  $\alpha$  – константа, описывающая взаимодействие с тепловым резервуаром,  $\sigma = \pm 1$ ,  $J_1 = 5$  К и  $J_2 = -0,4$  К – параметры внутри- и межцепочечного взаимодействий

соответственно,  $S = 2$  – спин иона кобальта (в высокоспиновом состоянии),  $k$  – константа Больцмана,  $T$  – температура,  $\mu$  – магнитный момент иона,  $B$  – внешнее магнитное поле. Параметр внутривещного ФМ взаимодействия был получен из измерений магнитной восприимчивости при высоких температурах [11], удельной теплоемкости [9] и теоретических расчетов [12], и определяется шириной плато на кривой намагниченности ( $\Delta B = 1,2$  Тл для  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ ). Аналогичная формула для 2D случая может быть получена, если положить  $J_1 = 0$  К и  $J_2 = -5$  К [14], и принять, что  $\sigma$  – суперспин целой цепочки.

В работе [8] проводилось экспериментальное исследование релаксации намагниченности в  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ . Магнитное поле включалось скачком до заданного значения и выдерживалось в течение нескольких часов. При этом наблюдались различия в релаксационных кривых: при малых полях значение магнитного момента постепенно увеличивалось, при больших – кривая намагниченности стремилась вниз. Никакого объяснения данного явления предоставлено не было, поэтому мы решили на основе готовых моделей [14, 15] провести исследование релаксации намагниченности. В этой работе проводились расчеты при температурах 5 и 8 К в нарастающем и убывающем магнитных полях в 2D случае и только для 8 К в нарастающем поле в 3D. Для расчета в нарастающем поле бралась произвольная АФМ структура, затем проводилась ее релаксация при заданной температуре без магнитного поля. После этого скачком включалось магнитное поле до заданного значения, и исследовалась релаксация магнитного момента в этом поле. Для расчета в убывающем поле бралась полностью намагниченная структура (характерная для максимального магнитного поля), а затем так же скачком включалось магнитное поле до заданного значения. Релаксация магнитного момента в нарастающем и убывающем магнитных полях идет по разному из-за различного хода кривых намагниченности.

Примеры кривых релаксации намагниченности для 2D модели при 5 К и при 8 К представлены

на рис. 1. На рис. 2 представлены примеры полученных структур при значениях магнитного поля порядка 2, 4 Тл при температуре 5 К в различных временных точках. Время релаксации подбиралась таким образом, чтобы результаты наилучшим образом сочетались с экспериментальными данными из статьи [8]. Типичное количество временных точек расчета – порядка  $2 \cdot 10^6$ .

Заметим, что на графиках все значения намагниченностей стремятся к значению  $1/3$ . Это же можно наблюдать на рис. 2 в процессе релаксации: постепенно происходит разбивка на кластеры, размер которых затем постепенно уменьшается, пока наконец не получается однородная структура со средним значением намагниченности  $1/3$ .

Для 2D кластера исследовались различия в ходе релаксации намагниченности при ступенчатом изменении поля от нуля до заданного значения (нарастающее поле) и от максимума до заданного значения (убывающее поле). Полученные результаты представлены на рис. 3 а и находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом [8].

Примеры кривых релаксации намагниченности для 3D модели при 8 К представлены на рис. 3 б. Хотелось бы подчеркнуть их хорошее согласие с результатами двумерного моделирования. Время релаксации для 3D модели при 5 К происходит значительно медленнее, чем при 8 К, при этом каких либо качественных отличий в данном расчете не ожидалось, поэтому было решено ограничиться расчетом при 5 К только для 2D кластера. На рис. 4 представлены примеры полученных структур при значениях магнитного поля порядка 2,1 Тл при температуре 8 К в различных временных точках для трехмерной структуры. Время релаксации подбиралась таким образом, чтобы результаты наилучшим образом согласовываться с результатами двумерного моделирования. Типичное количество временных точек расчета – порядка  $2 \cdot 10^7$ . здесь так же видна тенденция к уменьшению «кластеризации» структуры, которая релаксирует к равновесному значению с со средней намагниченностью  $1/3$ .

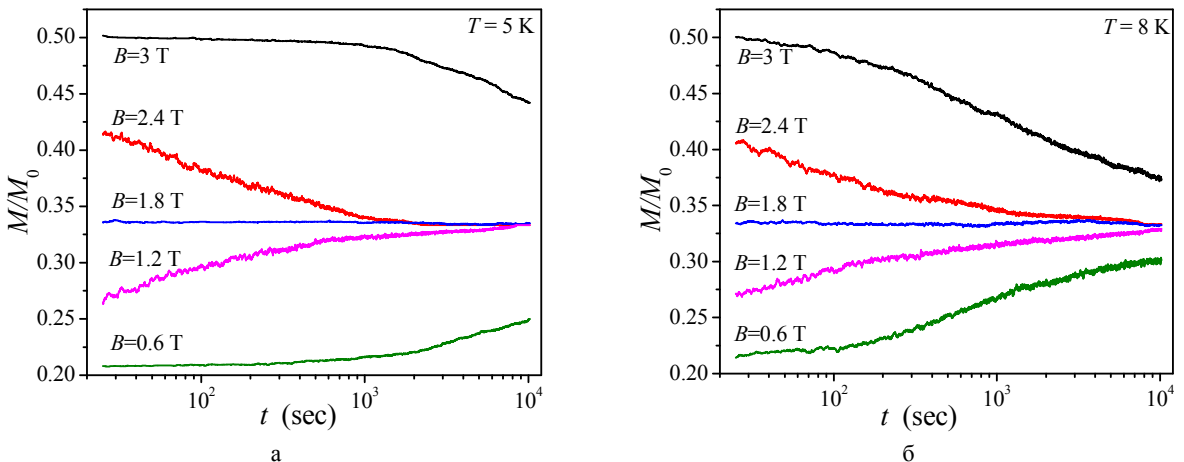


Рис. 1. Кривые релаксации намагниченности для 2D моделирования в различных нарастающих магнитных полях при  $T = 5$  К (а), и  $T = 8$  К (б)

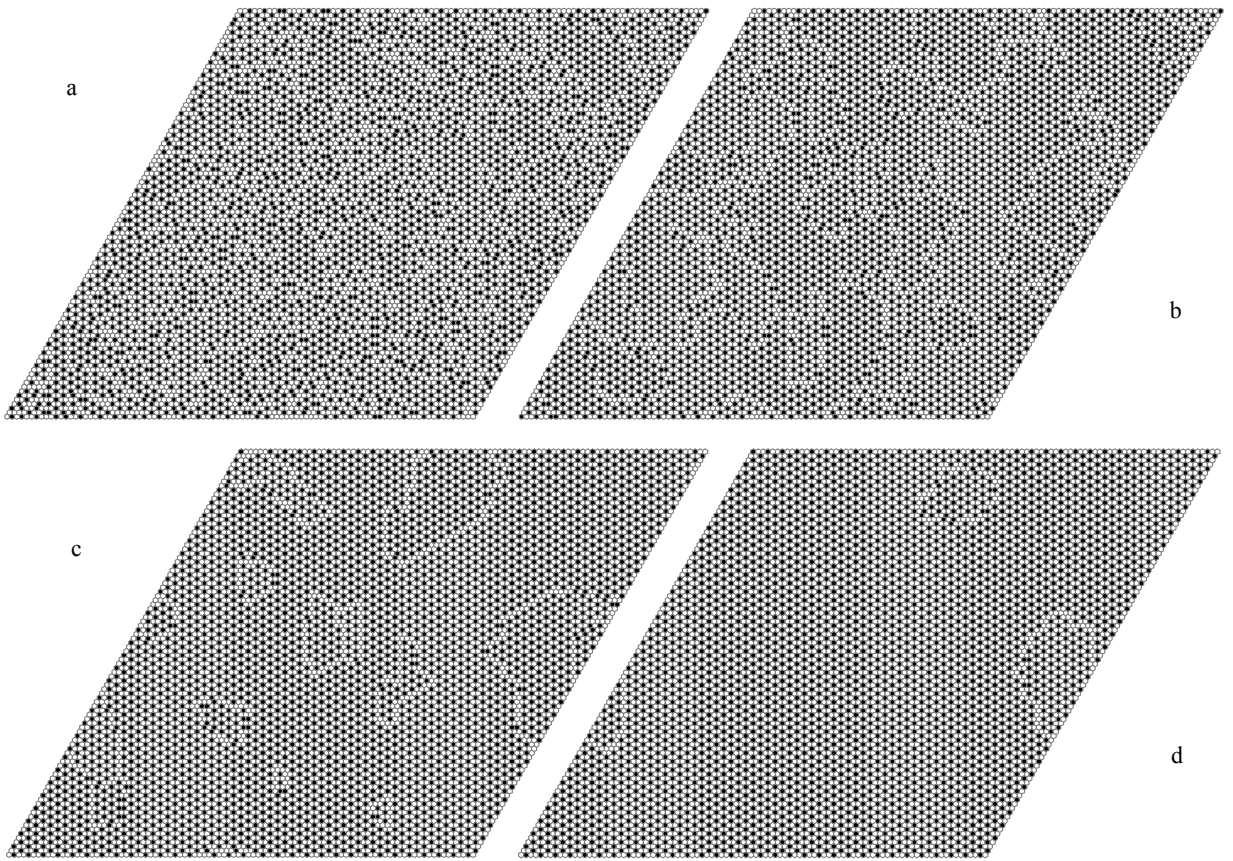


Рис. 2. Структура 2D кластера в магнитном поле 2,4 Тл для времен порядка: начало отсчета (а), 125 с (b), 500 с (c) и 2500 с (d) при температуре 5 К

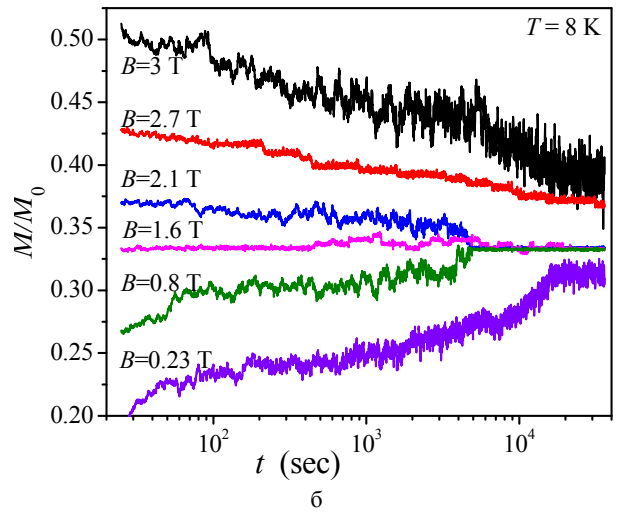
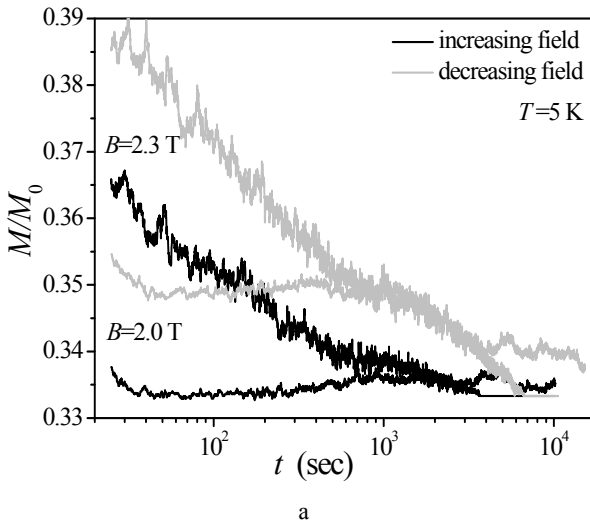


Рис. 3. Кривые релаксации намагниченности для 2D моделирования в нарастающем (черные кривые) и убывающем (серые кривые) магнитных полях при  $T = 5$  К (а), и для 3D моделирования в различных нарастающих магнитных полях при  $T = 8$  К (б)



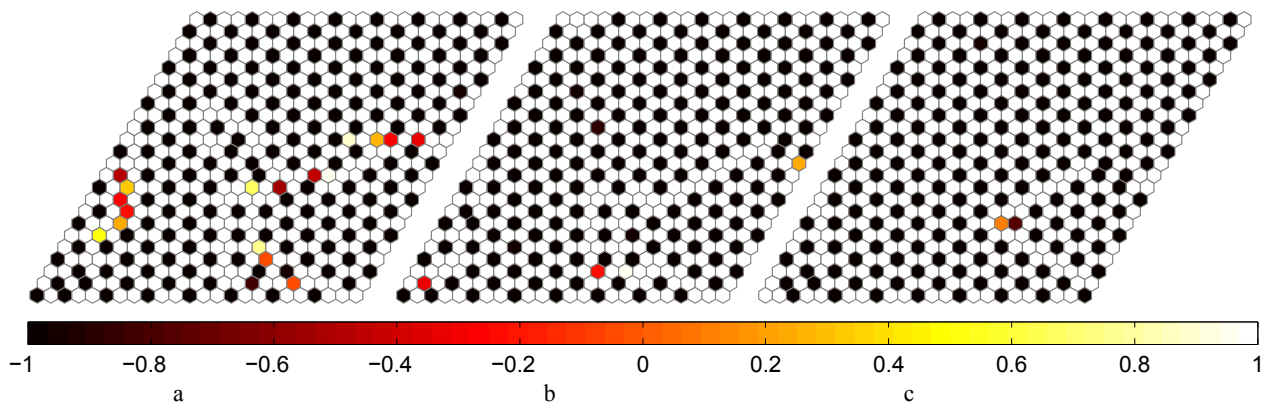


Рис. 4. Усредненные значения намагниченностей по цепочкам для 3D моделирования в магнитном поле 2,1 Тл для времен порядка: 40 с (а), 800 с (b) и 5000 с (с) при температуре 8 К

В заключении, проведен расчет релаксации намагниченности при заданных значениях магнитного поля в рамках ранее разработанных 2D и 3D моделей на треугольной решетке в соответствии с законом переворота спина, близким по форме к уравнению глауберовской динамики. Зависимость кривых намагниченности от времени находятся в качественном согласии с экспериментом. Выдвинуто предположение, что следствием релаксации является переход структуры в мономерное состояние со средним значением намагниченности порядка  $1/3$ .

Работа частично поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований и Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.».

## Литература

1. Mekata M. J. Phys. Soc. Jpn. 42, 76. 1977.
2. Aasland S., Fjellvag H., Hauback B. Solid State Commun. 101, 187. 1997.
3. Maignan A., Hardy V., Hebert S., Drillon M. et. al. J. Mater. Chem. 1231, 14. 2004.
4. Cao G., Durairaj V., Chikara S., Parkin S., Schlottmann. P. Phys. Rev. B 75, 134402. 2007.

5. Kudasov Y. B. Phys. Rev. Lett. 96, 027212 (2006).
6. Kudasov Y. B. J. EPL 78, 027212. 2007.
7. Hardy V., Flahaut D., Lees M. R., Petrenko O. A. Phys. Rev. B 70, 214439. 2004.
8. Hardy V., Lees M. R., Petrenko O. A., Paul D. McK. et. al. Phys. Rev. B 70, 064424. 2004.
9. Hardy V., Lambert S., Lees M. R., Paul D. McK. Phys. Rev. B 68, 014424. 2003.
10. Maignan A., Michel C., Masset A. C., Martin C., Raveau B. Eur. Phys. J. B 15, 657. 2000.
11. Kageyama H., Yoshimura K., Kosuge K., Mitamura H., Goto T. J. Phys. Soc. Jpn. 66, 3996. 1997.
12. Fresard R., Laschinger C., Kopp T., Eyert V. Phys. Rev. B 69, 140405(R). 2004.
13. Petrenko O. A., Wooldridge J., Lees M. R., Manuel P., Hardy V. Eur. Phys. J. B 47, 79. 2005.
14. Kudasov Yu., Korshunov A., Pavlov V., Maslov D. Phys. Rev. B 78, 132407. 2008.
15. Kudasov Yu., Korshunov A., Pavlov V., Maslov D. J. Low Temp Phys 159, N 1–2, 76 (2010).
16. Yao X., Dong S., Yu H., Liu J. Phys. Rev. B 74, 134421. 2006.
17. Qin M., Wang K., Liu J. Phys. Rev. B 79, 172405. 2009.
18. Glauber R. J. Math. Phys. 4, 294. 1963.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ И ТЕТРАБРОММЕТАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

*А. В. Грунин, Д. В. Ткачук, О. В. Корочкина, О. С. Кротова*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для дозиметрического сопровождения радиационных исследований в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на моделирующих установках (МУ) широко применяются метод ЦДП (цветовых дозиметров пленочных) и радиотермолюминесцентный метод дозиметрии ИКС (индивидуального контроля с помощью стекол) с детекторами на основе алюмофосфатного стекла ИС-7 [1, 2].

Разработка и совершенствование методов дозиметрии, с целью увеличения точности измерений, всегда будут представлять большой интерес. Цветовые и «окрашиваемые» пленки предоставляют возможность многократного съема информации о поглощенной дозе в течение длительного времени, однако сам дозиметр пригоден лишь для одноразового использования. В связи с этим очень актуальна разработка пленочных дозиметров для диапазона поглощенных доз ионизирующего излучения (ИИ) от 10 до  $3 \cdot 10^3$  Гр.

Современные пленочные дозиметрические материалы обладают сравнительно низкой чувствительностью, поэтому повышенный интерес к ним проявляется только в области высоких поглощенных доз  $10^3$ – $10^6$  Гр. Следует отметить целый ряд их положительных свойств: независимость показаний дозы от мощности дозы, высокая механическая прочность, малые размеры [3]. Широко распространенные в настоящее время цветные пленочные дозиметры позволяют определять величину поглощенной дозы ИИ в поликарбонатной пленке в диапазоне от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  Гр [1, 4, 5].

Цель работы:

– исследование основных характеристик новых дозиметрических материалов на основе ароматических аминов и тетрабромметана при измерении поглощенных доз ионизирующих излучений в диапазоне от 50 до 1 кГр;

– исследование основных характеристик новых дозиметрических материалов, с улучшенными свойствами, для измерения поглощенных доз ионизирующих излучений в диапазоне от 200 до 1000 Гр.

Объекты исследований – образцы дозиметрических материалов размером  $(10 \times 60)$  мм<sup>2</sup>, приготовленные в виде пленок толщиной от 110 до 200 мкм из раствора в дихлорэтаноле ПВХ массовый марки М64 с добавками ароматического амина Ам и СВг<sub>4</sub> (концентрация от 0,1 до 0,5 моль/л); образцы дозиметрических материалов размером  $(12 \times 30)$  мм<sup>2</sup>, приготовленные в виде пленок толщиной  $115 \pm 5$  мкм из раствора в дихлорэтаноле ПВХ с добавками ароматического

амина Ам и СВг<sub>4</sub> (концентрация 0,02 моль/л) с последующим нанесением слоя поливинилового спирта (ПВС). Дозиметрические пленки изготовлены в ФГУП «НИФХИ им. Л. Я. Карпова» и поставлены в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в конце 2008 г. и начале 2010 г. соответственно.

Полимерные образцы пленок содержали донорно-акцепторные добавки N, N, N', N'-тетраметил-4, 4'-диаминодифенилметана и СВг<sub>4</sub>. Образцы были приготовлены из раствора в дихлорэтаноле ПВХ с добавками Ам и СВг<sub>4</sub> путем испарения растворителя. Для этого вначале растворяли ПВХ в дихлорэтаноле в массовом соотношении 1 : 50. Затем в растворенный ПВХ поочередно вводили Ам и СВг<sub>4</sub> в нужной концентрации при красном свете и размешивали в течение 30 мин. Полученный раствор выливали в специально приготовленную емкость, представляющую собой стакан диаметром 7 см и высотой 5 см с натянутой на дно этого стакана целлофановой пленкой. Стакан помещали в вытяжном шкафу на горизонтальную металлическую плоскость, которую предварительно юстировали с помощью уровня. Раствор сушили в темноте при комнатной температуре и при отключенной тяге в течение 5–7 дней, после чего целлофановую пленку удаляли, а сформированную пленку досушивали в термостатирующем устройстве при 30–35 °С в течение 1–2 суток. Затем пленку разрезали на образцы и помещали в пакет из черной бумаги для хранения и исследований. Методика приготовления дозиметрических материалов как для первого объекта исследований, так и для второго, одинакова за одним исключением – во втором случае готовые образцы покрывали слоем поливинилового спирта (ПВС) толщиной  $5 \div 10$  мкм.

Сводные данные по 20 партиям образцов дозиметрических пленок приведены в табл. 1. Сводные данные по весовым составам дозиметрических пленок в зависимости от концентрации примесей С приведены в табл. 2. Данные по партии образцов дозиметрических пленок с ПВС приведены в табл. 3.

В ходе исследований характеристик новых дозиметрических материалов было необходимо в соответствии с общепринятыми процедурами:

– оценить работоспособность исследуемых образцов в условиях воздействия тормозного излучения (ТИ) импульсных, импульсно-периодических ускорителей электронов и при статическом облучении;



– исследовать фединг, получить зависимость оптической плотности  $A$  дозиметрического материала от времени  $t$  после облучения;

– получить зависимость оптической плотности  $A$  пленок от поглощенной дозы  $D$  ТИ;

– исследовать влияние на дозиметрический материал паразитной подсветки при измерениях;

– установить нижний и верхний пределы дозовой чувствительности дозиметрического материала.

Измерения оптической плотности  $A$  дозиметрических пленок проводились на спектрофотометре Genesys 6 [6]. Экспозиционная доза ТИ измерялась методом ИКС, а поглощенная в пленках доза ТИ определялась расчетным путем с привлечением методики и программы ТРИАДА [7].

Таблица 1

Сводные данные по 20 партиям образцов дозиметрических пленок без ПВС

№ партии	Толщина пленки $h$ , мкм	Концентрация примесей $C$ , моль/л	Сушка при $t_{\text{комн.}}$ , дни	Дополнит. сушка, °C/дни	Диапазон измеряемых доз $D$ , Гр	$A(D)_{100}$ , отн. ед.	$A(D)_{250}$ , отн. ед.
1	125±5	0,5	7	–	50–250	0,50	2,04
2	125±5	0,5	7	–	50–250	0,50	2,00
3	125±5	0,5	7	–	50–250	0,43	1,91
4	150±5	0,5	7	35/1	50–250	0,88	2,93
5	125±5	0,5	7	25/1	50–250	0,44	1,91
6	145±5	0,5	7	35/2	50–250	0,58	2,12
7	160±5	0,5	5	30/1	50–250	0,50	1,72
8	150±5	0,5	7	30/1	50–250	0,50	2,09
9	150±5	0,5	7	32/1	50–250	0,53	2,02
10	140±5	0,5	6	–	50–250	0,39	1,30
11	200±5	0,5	7	30/2	50–250	0,45	1,50
12	150±5	0,55	7	35/2	50–250	0,41	1,33
13	150±5	0,6	7	35/2	50–250	0,20	0,66
14	120±5	0,3	7	–	50–300	0,41	1,50
15	120±5	0,3	7	–	50–400	0,31	1,20
16	120±5	0,2	7	–	70–400	0,25	0,95
17	120±5	0,2	7	–	70–400	0,25	1,00
18	135±5	0,15	7	30/1	70–400	0,25	1,05
19	120±5	0,13	7	30/1	100–700	0,20	0,75
20	110±5	0,1	7	30/1	100–1000	0,11	0,29

Таблица 2

Сводные данные по весовым составам дозиметрических пленок без ПВС в зависимости от концентрации примесей С

Элемент, %	Концентрация примесей $C$ , моль/л					
	0,02	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
С	38,7	38,6	38,6	38,4	38,3	38,2
N	0,04	0,2	0,4	0,6	1	1,3
H	4,83	4,8	4,7	4,8	4,6	4,6
Br	0,45	2,3	4,6	6,7	11,4	14,3
Cl	55,98	54,1	51,7	49,5	44,7	41,6

Таблица 3

Данные по партии образцов дозиметрических пленок с ПВС

№ партии	Толщина пленки $h$ , мкм	Концентрация примесей $C$ , моль/л	Сушка при $t_{\text{комн.}}$ , дни	Диапазон измеряемых доз $D$ , Гр
1	115±5	0,02	5–7	200–1000

Исследованы дозиметрические пленки из двадцати партий опытных образцов, обладающие различными исходными характеристиками: толщиной, концентрацией примесей, временем сушки и, как следствие, различными радиационной чувствительностью и диапазоном поглощенных доз. Найдены оптимальные приемы работы с дозиметрическими пленками в составе дозиметров при работе в полях ТИ МУ и при определении оптической плотности пленок на спектрофотометре Genesys 6.

В качестве оптимального окружения дозиметрической пленки для спектра ТИ МУ СТРАУС-2 [8] с граничной энергией  $\approx 3$  МэВ на данном этапе исследований выбраны алюминиевые пластины толщиной 2 мм (с фронтальной стороны) и 1 мм (с тыльной стороны), так как при этом поглощенная доза в дозиметрической пленке равна поглощенной дозе в равновесном слое воздуха (кремния), для спектра ТИ МУ ЛИУ-30 [9] с граничной энергией  $\approx 40$  МэВ предложена конструкция дозиметра – медные пластины толщиной 5 мм (с фронтальной стороны) и 3 мм (с тыльной стороны). Рассчитаны энергетические зависимости чувствительности таких дозиметров в диапазоне энергий гамма-квантов от 50 до 40 МэВ.

В качестве оптимального окружения дозиметрической пленки для спектра  $\gamma$ -излучения установки ЭТАЛОН-3 [10] выбраны алюминиевые пластины 2 мм (с фронтальной и тыльной сторон).

Исследованы зависимости оптической плотности  $A$  пленок от длины волны  $\lambda$  спектрофотометра (см. рис. 1) и установлено, что пленки имеют максимум радиационной чувствительности на длине волны  $\lambda \approx 619 \div 621$  нм.

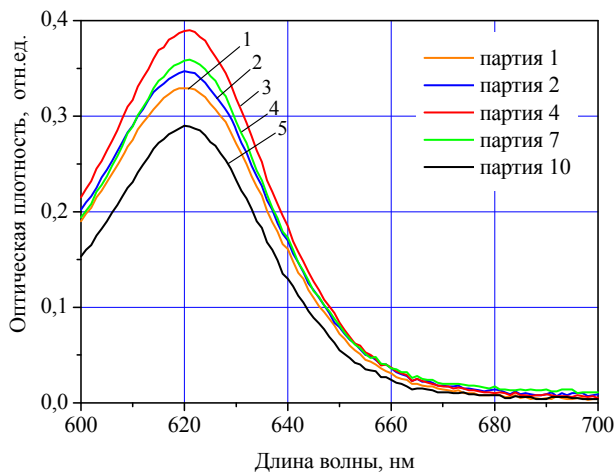


Рис. 1. Зависимости оптической плотности пленок из партий 1, 2, 4, 7, 10 от длины волны  $\lambda$  после импульса ТИ МУ СТРАУС-2: 1 – партия 1; 2 – партия 2; 3 – партия 4; 4 – партия 7; 5 – партия 10

Исследован фединг после импульсного облучения (см. рис. 2, 3). Фединг можно описать эмпирическим уравнением

$$A = A_0 + B_1 \exp(-t/\tau_1) + B_2 \exp(-t/\tau_2),$$

где  $t$  – время, прошедшее после облучения,  $A_0, B_1, B_2, \tau_1, \tau_2$  – константы, причем  $\tau_1 \sim 10^2$  мин., а  $\tau_2 \sim 10^3$  мин., а параметры  $A_0, A_1, A_2$  зависят от поглощенной дозы и принимают значения от 0,01 до 3.

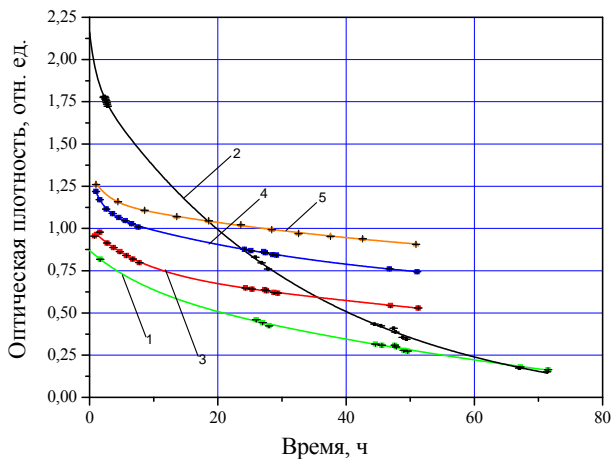


Рис. 2. Зависимости оптической плотности пленок из партий 4, 6, 15, 19, 20 от времени (дозы ТИ МУ ЛИУ-10-20: 200, 300, 400, 700, 1000 Гр): 1 – партия 4; 2 – партия 6; 3 – партия 15; 4 – партия 19; 5 – партия 20

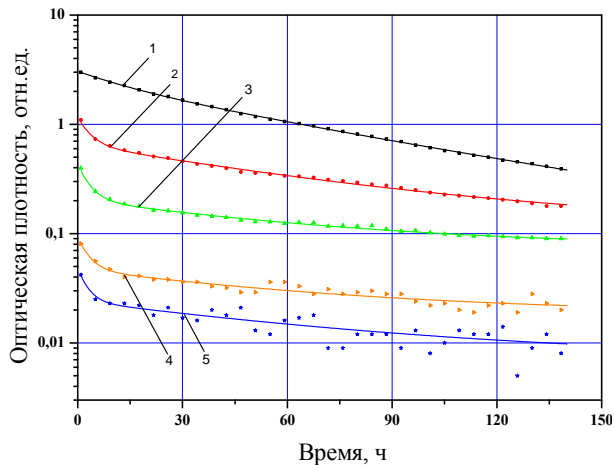


Рис. 3. Зависимости оптической плотности пленок из партии № 13 от времени для при поглощенных в них дозах ТИ МУ ЛИУ-30 в диапазоне от 22 до 514 Гр: 1 – доза 514 Гр; 2 – доза 198 Гр; 3 – доза 85 Гр; 4 – доза 37 Гр; 5 – доза 22 Гр

Определены зависимости оптической плотности  $A$  пленок от поглощенной дозы  $D$  ТИ, аппроксимированные степенной функцией,  $A = A_0 D^\Delta$ , где  $A_0$  принимает значения в диапазоне от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $8 \cdot 10^{-4}$ , а  $\Delta$  – находится в диапазоне от 1 до 1,5. При относительно малых поглощенных дозах наблюдается сверхлинейный характер дозовой зависимости образцов. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости оптической плотности пленок из партий № 4, 6, 15, 19, 20 от поглощенной в них дозы ТИ МУ ЛИУ-10-20 [11].

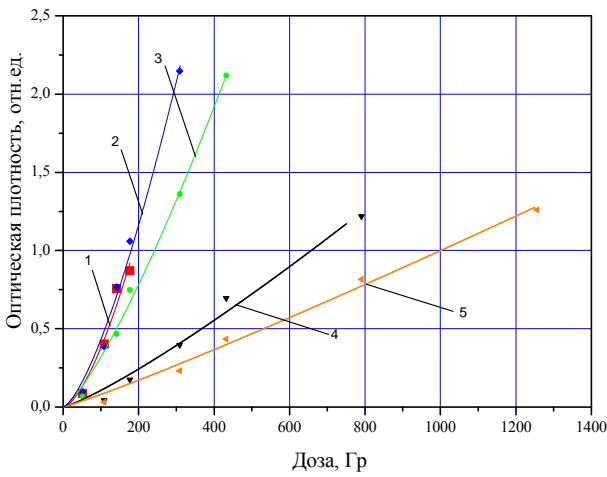


Рис. 4. Зависимости оптической плотности пленок из партий № 4, 6, 15, 19, 20 от поглощенной в них дозы ТИ МУ ЛУ-10-20: 1 – партия 4; 2 – партия 6; 3 – партия 15; 4 – партия 19; 5 – партия 20

Дозовые зависимости оптической плотности пленок, полученные разработчиками при воздействии  $\gamma$ -излучения источника  $^{60}\text{Co}$  несколько отличаются от дозовых зависимостей оптической плотности пленок, полученных при воздействии импульсного ТИ МУ ЛУ-10-20 и ЛИУ-30 (см. рис. 5, 6), что можно объяснить влиянием более высокой мощности дозы при импульсном облучении, федингом во время статического облучения, а также изменением свойств дозиметрических пленок при хранении.

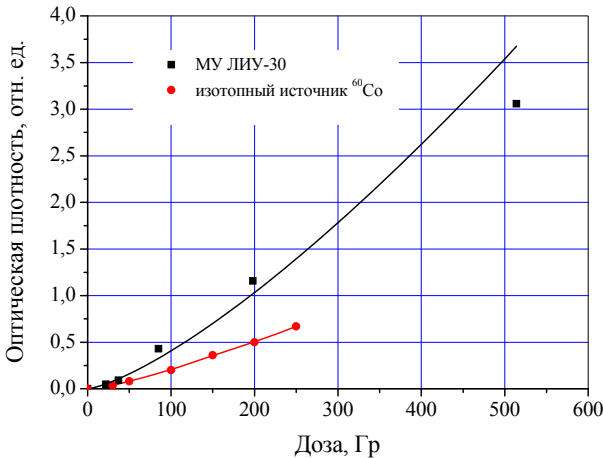


Рис. 5. Сравнение дозовых зависимостей для пленок из партии № 13: 1 – МУ ЛИУ-30; 2 – изотопный источник  $^{60}\text{Co}$

Получены зависимости изменения оптической плотности образцов, покрытых слоем поливинилового спирта (ПВС), после облучения дозами: 175, 350, 530, 700, 870, 1750, 2640 Гр. Показания снимались в течение 6 суток (см. рис. 7). Полученные кривые имеют

максимум в диапазоне от 10 до 100 ч. Через 5 суток величина  $A$  уменьшается на незначительную величину, лежащую в интервале от 10 до 20 % за одинаковый период времени, что характеризует высокую стабильность радиационного отклика.

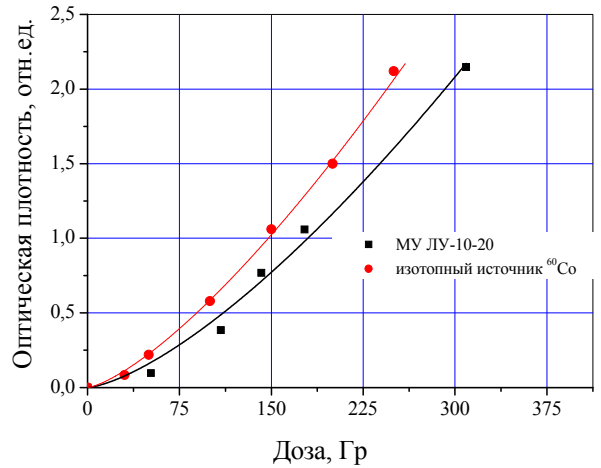


Рис. 6. Сравнение дозовых зависимостей для пленок из партии № 6: 1 – изотопный источник  $^{60}\text{Co}$ ; 2 – МУ ЛУ-10-20

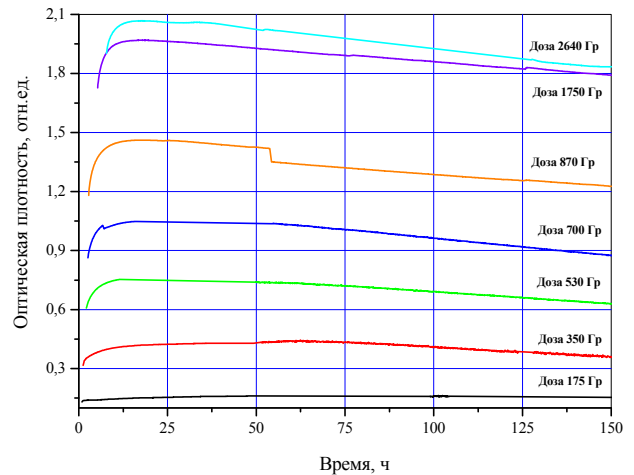


Рис. 7. Зависимость оптической плотности образцов с ПВС слоем от времени после облучения дозами 175, 350, 530, 700, 870, 1750, 2640 Гр

Определена зависимость оптической плотности  $A$  пленок от поглощенной дозы  $D$  ТИ, аппроксимированная функцией

$$y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + (x/x_0)/p),$$

где  $A_1, A_2, x_0, p$  – константы (см. рис. 8).

Согласно сделанным оценкам, относительная погрешность измерений оптической плотности пленочных дозиметров на спектрофотометре Genesys 6 примерно равна 3–7 % в зависимости от партии пленок.

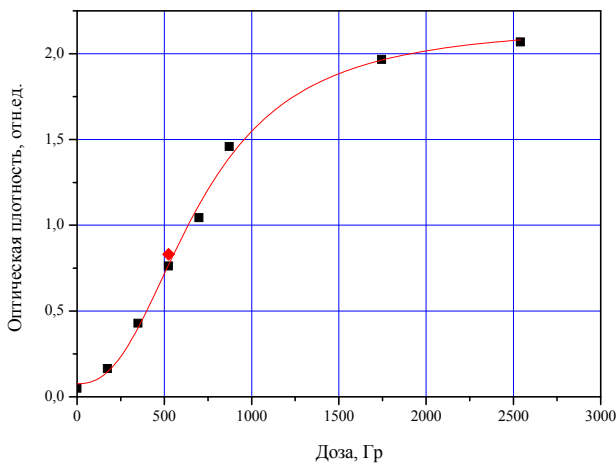


Рис. 8. Зависимость оптической плотности пленок с ПВС слоем от поглощенной в них дозы  $\gamma$ -излучения установки ЭТАЛОН-3

Результаты исследований свидетельствуют о возможности применения новых дозиметрических материалов на основе ароматических аминов и тетрабромметана для измерения поглощенных доз ТИ в диапазоне от 50 до 1 кГр после отработки производителем технологии по обеспечению стабильности характеристик (чувствительности). В 2009 г. ФГУП «НИФХИ им. Л. Я. Карпова» провел такие работы. Были разработаны новые пленочные дозиметрические материалы, характерной особенностью которых является нанесенный на их поверхность слой поливинилового спирта, играющий роль защитного покрытия, препятствующего проникновению атмосферного кислорода вглубь образцов и улечиванию из них активного соединения СВг<sub>4</sub>. В настоящий момент проводятся исследования полученных дозиметрических материалов в составе дозиметра для определения области их практического использования.

Для пленок, участвовавших в эксперименте на установке ЭТАЛОН-3, наличие защитного слоя обеспечило повышение стабильности чувствительности при хранении материалов, а также радиационного отклика облученных образцов.

1. Иванов В. И. Курс дозиметрии: Учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 400.

2. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Кеирим – Мааркус И. Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977. С. 224.

3. Колнинов О. В., Колесникова В. В., Шаварин Ю. Я. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем. Стойкость-2007». М., 2007. Вып. 10. С. 197–198.

4. Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях / Под ред. П. А. Красовского. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007.

5. Пудов В. П., Генералова В. В., Громов А. А. // VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2006. С. 368–372.

6. Руководство пользователя для спектрофотометра Genesys 6. США. 2002.

7. Грунин А. В., Шмаров А. Е. // VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2006. С. 53–59.

8. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Филиппов В. О., Аверченков В. Я. // В сб.: Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. Вып.1. С. 402–407.

9. Басманов В. Ф., Герасимов А. И., Гордеев В. С. и др. // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии: Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. С. 139–145.

10. Лазарев С. А., Донской Е. Н., Ковшов К. Н., Иванов Г. А. Расчет пространственно-спектральных распределений поля излучения изотопной установки ЭТАЛОН-3 // VIII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. С. 323–332.

11. Завьялов Н. В., Тельнов А. В., Хохлов Ю. А. и др. // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 2, 3 (29, 30). С. 39–41.

# ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР С ЛАЗЕРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

А. А. Зубков, Н. В. Купырин, Н. Н. Хавронин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

Источник импульсного питания фотоэлемента представляет собой генератор, собранный по схеме Введенского на основе разрядника с лазерным поджигом. Он предназначен для подачи короткого высоковольтного импульса напряжения на фотокатод специального фотоэлемента (ФЭК) СВЧ-генератора в момент его облучения лазерным пучком ультракороткой длительности, создающим сверхсветовую бегущую волну фотоэлектронной эмиссии.

Основные технические характеристики ФЭК [1] (нагрузка генератора):

- диаметр фотокатода 5 см;
- зазор фотокатод-анод 2...4 мм;
- волновое сопротивление 75 Ом;
- емкость 20...50 пф.

Основные параметры импульса лазерного поджига генератора:

- длина волны пускового импульса лазерного излучения 1053 нм;
- длительность пускового лазерного импульса 150 пс;
- энергия пускового лазерного импульса  $\approx 1$  мДж;
- диаметр пучка в фокусе объектива 200 мкм;
- максимальная частота следования импульсов 0,3 Гц.

Требования к характеристикам генератора:

- полярность импульса напряжения отрицательная;
- амплитуда импульса напряжения  $\leq 100$  кВ;
- длительность импульса напряжения на полувысоте  $\leq 10$  нс;
- длительность фронта импульса напряжения на уровне 0,1–0,9  $< 2$  нс;
- задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом  $< 50$  нс;
- нестабильность задержки срабатывания  $\leq \pm 2$  нс.

## Конструкция генератора

На рис. 1 представлена схема генератора.

Отработка схемы генератора и конструкции его разрядника была проведена на макете, рассчитанном на выходное напряжение до 60 кВ [2].

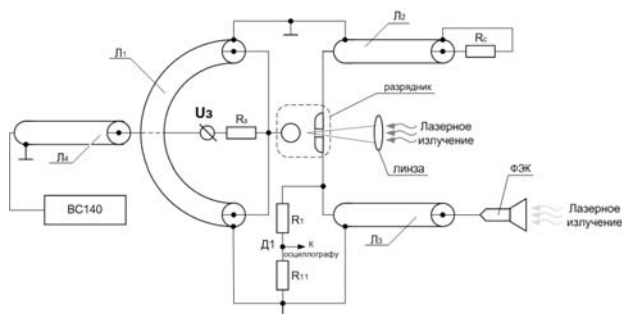


Рис. 1. Схема генератора импульсного питания ФЭК:  $L_1$  – формирующий кабель;  $L_2$  – согласующий кабель;  $L_3$  – передающий кабель;  $L_4$  – зарядный кабель;  $R_3$  – зарядное сопротивление;  $R_C$  – согласующее сопротивление;  $D_1$  – омический делитель напряжения

Отличие данной конструкции генератора от его макета состоит в следующем:

- увеличены все зазоры от элементов, находящихся под постоянным и импульсным напряжением, до заземленного корпуса генератора (по маслу – до 50 мм, по поверхности изоляторов – до 85 мм);
- уменьшена длительность импульса напряжения до 7 нс (длина формирующего кабеля  $\approx 1$  м) для уменьшения вероятности пробоя вакуумного промежутка ФЭКа при увеличении подаваемого на него напряжения до 100 кВ;
- изменена конструкция корпуса разрядника для возможности его использования на напряжения до 100 кВ и давления до 25 ати;
- конструктивно изменен ввод газа в разрядник для возможности регулировки зазора без разборки самого разрядника.

Доработанная конструкция генератора и его составных частей позволила в несколько раз сократить время и усилия при перестройке генератора с одного напряжения на другое, расширить диапазон рабочих напряжений для одного зазора в разряднике.

В качестве формирующего и согласующего кабелей используется кабель марки КВИ-120 длиной порядка 1 и 1,5 м соответственно, в качестве передающего – кабель марки РК75-7-21 длиной 3 м со специальным разъемом для подключения к ФЭК (предоставлен ФГУП-ВНИИОФИ). Зазор в разряднике регулируется от 0 до 8,5 мм, а давление в нем – от 0 до 25 ати. В качестве рабочего газа в разряднике используется азот высокой очистки.

## Характеристики генератора

Под характеристиками генератора понимаются параметры импульса напряжения на нагрузке (амплитуда, длительности фронта на уровне 0,1–0,9 и импульса на полувысоте), а также время задержки срабатывания генератора и его разброс при различных комбинациях зазора и давления в разряднике в зависимости от зарядного напряжения.

Нагрузку генератора ФЭК, можно представить как вакуумный промежуток с бесконечно большим сопротивлением. Т. к. волновое сопротивление передающего кабеля 75 Ом ( $Z_3$  на рис. 1), то в качестве имитации вакуумного промежутка ФЭК можно использовать высокоомное сопротивление порядка единиц килоом. В экспериментах в качестве нагрузки генератора использовался высокоомный ( $R_2 = 2,95$  кОм) омический делитель напряжения ( $K_{дел} = 2306$ ), размещенный непосредственно в корпусе ФЭК.

В экспериментах зазор в разряднике изменялся от 0,25 до 2,25 мм, а давление в нем – от 0 до 20 ати.

Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на высокоомной омической нагрузке представлены на рис. 2.

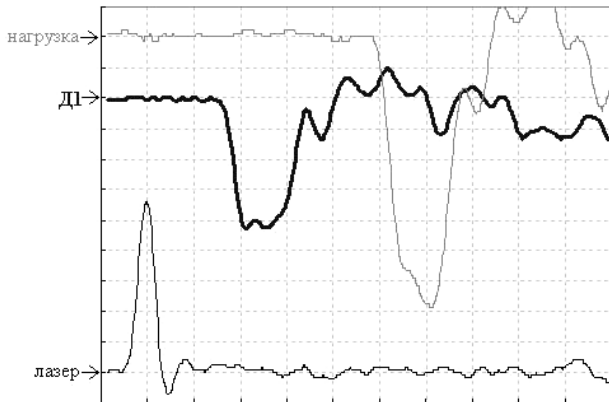


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на высокоомной омической нагрузке: лазер – пусковой импульс лазерного излучения. Зарядное напряжение генератора – 80 кВ, зазор в разряднике – 2,25 мм, давление в разряднике – 12,5 ати. Масштаб напряжения – 10 кВ/деление, масштаб времени – 5 нс/деление

В ходе экспериментов были получены следующие характеристики генератора:

- амплитуда импульса напряжения на нагрузке регулируется в диапазоне (10–100) кВ;
- длительность импульса напряжения на нагрузке на полувысоте 7 нс;
- длительность фронта импульса напряжения на нагрузке на уровне 0,1–0,9 2 нс;
- частота следования импульсов напряжения на нагрузке 0,3 Гц.

Частота следования импульсов напряжения на нагрузке, в данных экспериментах, определялась только частотными возможностями лазера. Частота, с которой может работать данный генератор, определяется мощностью источника питания и количеством одновременно подключенных нагрузок. Максимальная частота при подключенных четырех нагрузках может составлять порядка 100 Гц.

Далее были проведены эксперименты по определению времени задержки срабатывания генератора и его разброс при различных комбинациях зазора и давления в разряднике в зависимости от зарядного напряжения.

Результаты этих экспериментов представлены в таблице, где время указано в наносекундах как среднearифметическое значение плюс/минус среднеквадратичное отклонение по 5 экспериментам. В качестве результатов представлены только те значения, которые удовлетворяют требованиям к характеристикам генератора: задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом не более 40 нс (за исключением задержки передающего кабеля не менее 10 нс), нестабильность задержки срабатывания менее 4 нс.

Так же были проведены эксперименты по отработке генератора, когда в качестве нагрузки использовался коаксиальный фотозлемент (ФЭК). В экспериментах фиксировались показания датчика Д1 при подаче основного лазерного импульса излучения на ФЭК и без его подачи. Расположение датчика Д1 позволяет регистрировать не только основной импульс напряжения (импульс напряжения бегущей волны к нагрузке), но и отраженный от нее.

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы двух этих экспериментов.

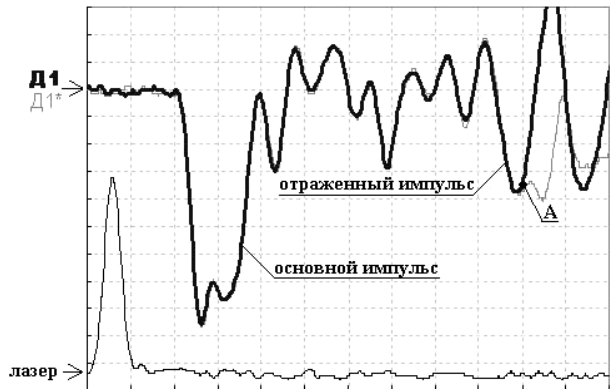


Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 при подаче основного лазерного импульса на фотокатод ФЭКа (Д1) и без его подачи (Д1\*): лазер – пусковой импульс лазерного излучения. Зарядное напряжение генератора – 30 кВ, зазор в разряднике – 1,75 мм, давление в разряднике – 5,5 ати. Масштаб напряжения Д1, Д1\* – 2 кВ/деление, масштаб времени – 5 нс/деление

Задержки срабатывания \* генератора при различных зазорах в разряднике ( $h$ ),  
в зависимости от давления в разряднике ( $P$ ) и зарядного напряжения ( $U$ ) генератора

$h = 0,75$ мм						
$U$ , кВ/ $P$ , ати	10	20	30	40		
3,0	5,1±0,3					
3,5	7,6±0,3					
4,0	15,7±0,4					
4,5	34,9±1,9					
8,0		5,8±0,3				
8,5		9,1±0,3				
9,0		15,6±0,7				
11,5			6,9±0,1			
12,0			11,2±0,5			
12,5			18,2±0,5			
15,0				7,4±0,7		
15,5				10,7±0,9		
16,0				11,9±1,2		
$h = 1,25$ мм						
$U$ , кВ/ $P$ , ати	20	30	40	50	60	
5,0	10,2±0,4					
5,5	19,7±0,7					
7,0		6,1±0,5				
7,5		9,0±0,3				
8,0		15,4±0,3				
10,5			9,9±0,3			
11,0			16,0±0,4			
11,5			15,7±1,1			
13,0				8,9±0,3		
13,5				14,9±1,4		
15,5					13,0±0,3	
16,0					13,0±0,4	
$h = 1,75$ мм						
$U$ , кВ/ $P$ , ати	30	40	50	60	70	80
5,5	11,6±0,4					
6,0	24,8±1,8					
7,5		10,7±0,3				
8,0		23,1±0,8				
9,0			11,1±0,5			
9,5			19,7±1,5			
11,5				8,9±0,5		
12,0				18,2±1,0		
13,0					9,3±0,3	
13,5					11,8±0,6	
15,5						12,2±0,5
16,0						15,4±1,1

\* среднеарифметическое значение плюс/минус среднеквадратичное отклонение по 5 измерениям, указанное в наносекундах.



$h = 2,25 \text{ мм}$							
$U, \text{ кВ/Р, ати}$	40	50	60	70	80	90	100
5,5	$11,3 \pm 0,6$						
6,0	$26,2 \pm 0,5$						
7,0		$9,9 \pm 0,3$					
7,5		$12,6 \pm 0,6$					
8,0		$29,8 \pm 1,6$					
9,0			$11,8 \pm 0,3$				
9,5			$14,0 \pm 0,3$				
10,5				$10,6 \pm 0,6$			
11,0				$25,0 \pm 1,4$			
12,5					$11,7 \pm 0,5$		
13,0					$17,4 \pm 1,0$		
14,0						$10,5 \pm 0,4$	
14,5						$18,2 \pm 1,1$	
15,5							$12,0 \pm 0,7$
16,0							$22,1 \pm 1,3$

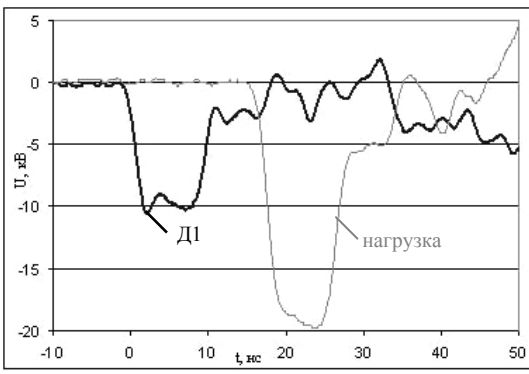
По осциллограммам на рис. 3 задержка срабатывания генератора с учетом передающего кабеля (задержка кабеля 17 нс) составила 29 нс (задержка между пусковым и основным лазерным импульсом была выставлена 28,5 нс). По отраженному от нагрузки сигналу на осциллограмме Д1 виден момент, когда происходит замыкание катод-анодного промежутка ФЭКа (срыв напряжения на Д1 – точка А на рис. 3), по времени этот момент соответствует моменту подачи основного импульса лазерного излучения на фотокатод ФЭКа. Из сравнения отраженных сигналов на осциллограммах Д1 и Д1\* получаем, что основной лазерный импульс излучения подается на фотокатод в момент, когда на нем формируется максимальная амплитуда напряжения.

Исходя из принципа работы и конструкции генератора имеется возможность поднятия его выходного напряжения без увеличения зарядного напряжения, за счет рассогласования волновых сопротивлений в контуре генератора (при полном согласовании волновых сопротивлений в контуре его выходное напряжение равно зарядному). Это возможно увеличив количество подключаемых формирующих кабелей (Л<sub>1</sub> на рис. 1) или отключая согласующий кабель (Л<sub>2</sub> на рис. 1). Увеличивая число формирующих кабелей до 4 штук (количество ограничено конструкцией генератора), мы тем самым уменьшаем их суммарное волновое сопротивление (кабели подключаются параллельно), а отключая согласующий кабель, мы увеличиваем «выходное» волновое сопротивление («выходное» волновое сопротивление складывается из волновых сопротивлений параллельно подключенных формирующего и передающего кабелей).

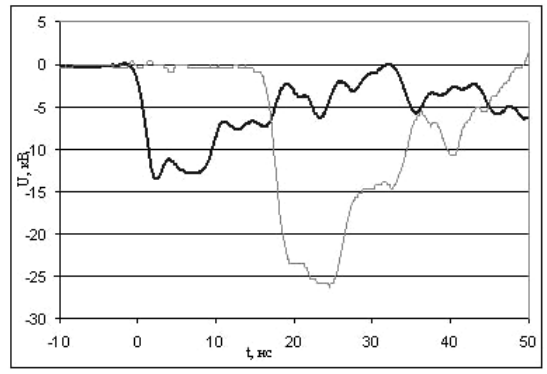
Исследование данной возможности было проведено на макете генератора импульсного питания фотоэлемента, в качестве нагрузки генератора использовался высокоомный делитель напряжения. Эти эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе изменялось количество формирующих линий без отключения согласующего кабеля. На втором этапе проводились аналогичные эксперименты, но с отключенным согласующим кабелем. В экспериментах запуск генератора осуществлялся не лазерным импульсом, а в режиме самопробоя разрядника, при этом зазор в разряднике выставлялся 0,9 мм, а давление – 5,8 ати, напряжение самопробоя составило 20 кВ.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов напряжения на внутреннем делителе Д1 и на нагрузке генератора для первого этапа экспериментов, а на рис. 5 – для второго этапа.

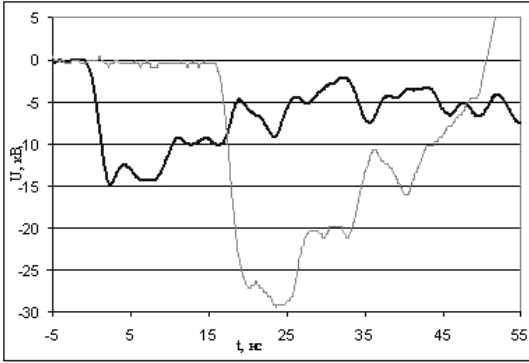
Из осциллограмм на рис. 4 и 5 видно, что при увеличении числа формирующих кабелей до 4 штук амплитуда напряжения на нагрузке генератора возрастает до значения 1,5 от зарядного, аналогичная ситуация (увеличение напряжения на нагрузке генератора) наблюдается и при отключении согласующего кабеля. Максимальная амплитуда напряжения на нагрузке генератора (1,7 от зарядного) достигается при использовании 4 формирующих кабелей и отключенном согласующем (осциллограммы на рис. 5 г). Также из осциллограмм видно, что при изменении числа формирующих кабелей и/или отключении согласующего меняется форма импульса напряжения на делителе Д1 и на нагрузке генератора (без изменения фронта). Это связано с появлением отражений в контуре генератора за счет его рассогласования.



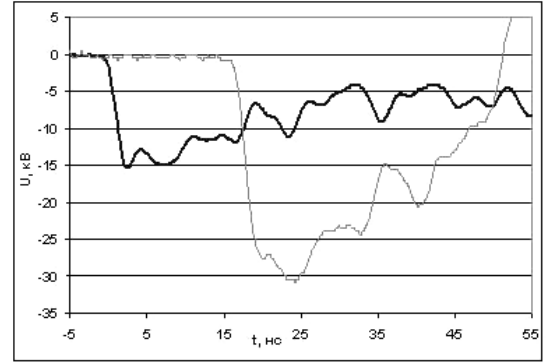
а) один формирующий кабель



б) два формирующих кабеля

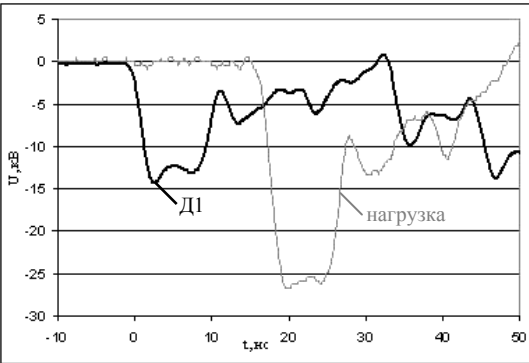


в) три формирующих кабеля

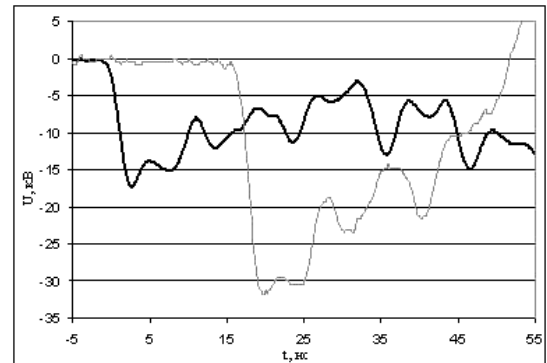


г) четыре формирующих кабеля

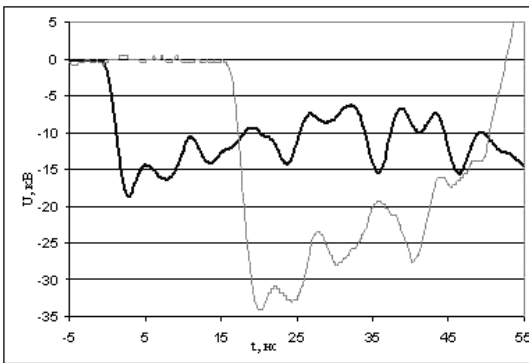
Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на нагрузке при разном количестве подключенных формирующих и согласующем кабеле



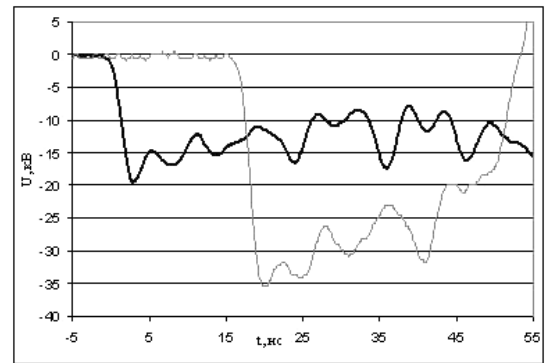
а) один формирующий кабель



б) два формирующих кабеля



в) три формирующих кабеля



г) четыре формирующих кабеля

Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на нагрузке при разном количестве подключенных формирующих кабелей и отключенном согласующем кабеле

## Заключение

Описанный в работе генератор имеет следующие параметры:

- амплитуда импульса напряжения на нагрузке регулируется в диапазоне (10–100) кВ;
- длительность импульса напряжения на нагрузке на полувывоте 7 нс;
- длительность фронта импульса напряжения на нагрузке на уровне 0,1–0,9 2 нс;
- задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом < 40 нс;
- нестабильность задержки срабатывания  $\leq \pm 2$  нс;
- частота следования импульсов напряжения 0,3 Гц.

Так же в работе была показана возможность увеличения напряжения на нагрузке относительно зарядного напряжения генератора (до 1,7 раза) без измене-

ния его конструкции. Увеличение напряжения на нагрузке относительно зарядного напряжения приводит к изменению формы импульса напряжения на нагрузке без изменения его фронта.

## Литература

1. Брюхневич Г. И., Воронкова Н. П., Пекарская Л. З., Шрамко Ф. Ф. Научно-технический отчет ФГУП-ВНИИОФИ по НИР «Разработка макета фотоэмиссионного элемента для широкополосного СВЧ-генератора». 15.12.2006 г.
2. Зубков А. А., Купырин Н. В., Хавронин Н. Н. Высоковольтный генератор импульсного питания фотоэлемента // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов. Т. 2. Томск, 2009. С. 293–300.

# ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ КАТОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАЦИИ ВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Д. В. Вялых, А. Е. Дубинов, И. Ю. Корнилова, И. Л. Львов, С. А. Садовой

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Принцип функционирования генераторов высокочастотного (ВЧ) излучения на основе разряда с полым катодом [1–5] заключается в том, что при соблюдении определенных условий при зажигании газового разряда с полым катодом происходит ВЧ-модуляция разрядного напряжения, и при подключении параллельно разрядному контуру электрической нагрузки на ней генерируются мощные электрические ВЧ-колебания. Наиболее вероятным механизмом формирования модуляции в разряде с полым катодом является неустойчивость прикатодного слоя разряда, тем не менее окончательно решенным данный вопрос на сегодняшний момент считать нельзя. Так что при создании приборов подобного типа с конкретными техническими характеристиками ориентироваться приходится пока что большей частью не на теоретические, а на эмпирические модели.

Данные экспериментальных исследований ВЧ-генераторов на основе разряда с полым катодом свидетельствуют о том, геометрические параметры катодной полости оказывают весьма существенное влияние на функционирование и технические характеристики генераторов. Одним из условий возникновения ВЧ-модуляции является выполнение определенного соотношения между геометрическими параметрами полости катода (полость имеет форму цилиндра, анод расположен возле одного из оснований цилиндра). На основе проведенных ранее исследований авторы пришли к выводу, что для возникновения устойчивой модуляции необходимо, чтобы длина полости была не меньше диаметра полости. Также экспериментально установленным и доказанным является тот факт, что диаметр полости оказывает существенное влияние на технические характеристики генератора, например, зависимость частоты генерации от диаметра имеет достаточно четко выраженную обратную зависимость.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния длины катодной полости на характеристики генерации ВЧ-генератора. Для этого авторами был проведен ряд экспериментов, в которых исследовались и сравнивались характеристики генератора, диаметр катодной полости которого был фиксирован, а длина могла варьироваться.

Схема газоразрядной камеры представлена на рис. 1. Открытый торец полого катода закрыт изолятором, на котором установлен плоский анод диаметром 40 мм. Внутри полого катода размещалась проводящая дискообразная вставка, которую можно

перемещать вдоль полого катода. На торцах вставки размещены пружинные контакты, которые обеспечивают надежное электрическое соединение с полым катодом. Перемещая проводящую вставку вдоль боковой поверхности полого катода, можно изменять длину его полости. Диаметр полости составлял 65 мм, максимально возможная длина – 120 мм. Для проведения ряда экспериментов предусмотрена возможность замены проводящей вставки на диэлектрическую, выполненную из фторопласта. Наличие диэлектрической вставки позволяет уменьшать длину и объем полости катода, исключая при этом влияние проводящего дна полого катода на процессы в генераторе.

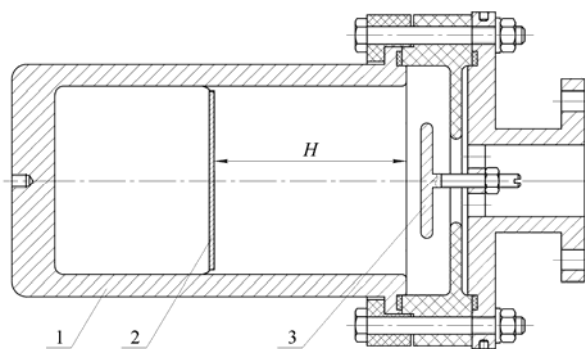


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры с изменяемой длиной полого катода. Цифрами обозначено: 1 – полый катод; 2 – проводящая вставка; 3 – анод

Схема цепи подключения генератора при проведении экспериментов показана на рис. 2. Принцип работы цепи заключается в следующем. После включения блока питания (на рис. 2 не показан) начинается зарядка емкости  $C$  и, соответственно, рост напряжения между катодом и анодом. После того, как это напряжение превысит напряжение пробоя в газоразрядной камере, начинается формирование газового разряда. Если при этом выполнены условия генерации, то напряжение, падающее на газоразрядном промежутке, подвергается сильной модуляции. Через разделительный конденсатор  $C_{\phi}$  осцилляции анодного потенциала поступают на сопротивление нагрузки  $R_n$ . Наличие разделительного конденсатора не позволяет шунтировать катод-анодный промежуток активной составляющей сопротивления нагрузки. Рабочим газом являлся воздух в диапазоне давлений 0,06–0,1 Торр.

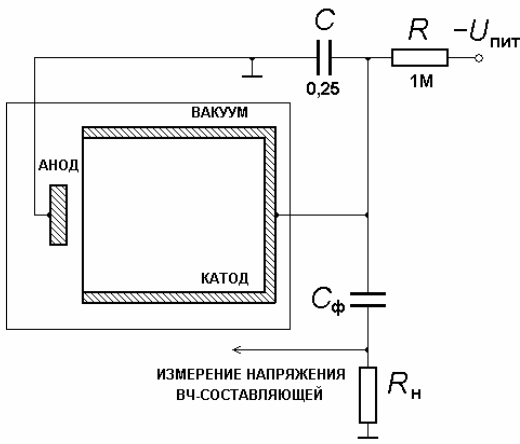


Рис. 2. Схема электрической цепи подключения ВЧ-генератора

Проведенные ранее исследования показали, что ВЧ-генераторы такого типа функционируют только в определенном диапазоне рабочих напряжений, то есть существуют некоторое пороговое значение, ниже которого генерация отсутствует, и некоторое предельное значение, выше которого длительность генерации становится равной нулю. При проведении данной работы было обнаружено, что диапазон рабочих напряжений зависит от длины полости катода. На рис. 3 представлены зависимости диапазона рабочего напряжения ВЧ-генератора от длины полости катода для диэлектрического и проводящего дна катода. Область, в которой происходит генерация, на рисунке заштрихована. По мере уменьшения длины катода сужается диапазон рабочего напряжения, при котором возможна модуляция разрядного напряжения.

На рис. 4 представлены полученные зависимости, демонстрирующие влияние длины полого катода на характеристики ВЧ-генератора. Зависимости рис. 4 а, б

демонстрируют уменьшение выходной мощности генерации по мере уменьшения длины полого катода. Предполагая, что формирование генерации вызывается процессами, происходящими в прикатодном слое газового разряда, данные зависимости можно легко объяснить тем, что уменьшение внутренней площади полого катода и, соответственно, уменьшение площади прикатодного слоя приводит к увеличению внутреннего сопротивления ВЧ-генератора, и, как следствие, к уменьшению максимальной выходной мощности.

Рис. 4 в, г демонстрируют сильную зависимость длительности генерации от длины полого катода. Дополнительно обращает на себя внимание факт, что диэлектрическое дно полого катода (диэлектрическая вставка) увеличило длительность генерации в 4–6 раз. Согласно предыдущим исследованиям авторов, длительность рабочего импульса генераторов такого типа ограничивается временем горения разряда в объемной форме, окончанию импульса генерации соответствует переход разряда из объемной стадии в шнуровую, т. е. из тлеющей формы в дугу. Исследования рабочих поверхностей катодов показали, что дуга в большинстве случаев формируется в области середины дна катодной полости. Значит, сделав дно непроводящим, можно, предотвратить или, во всяком случае, замедлить процесс шнурования разряда, что, в свою очередь, позволит повысить длительность импульса генерации. Таким образом, факт значительного увеличения длительности генерации при использовании диэлектрического дна достаточно просто объясняется на основе результатов более ранних исследований.

По мере уменьшения длины полости катода не очень сильно, но явно возрастает частота генерации, это наглядно видно на рис. 4 д, е. Можно заключить, что изменяя длину полости катода, можно осуществлять подстройку (небольшое изменение) частоты генерации.

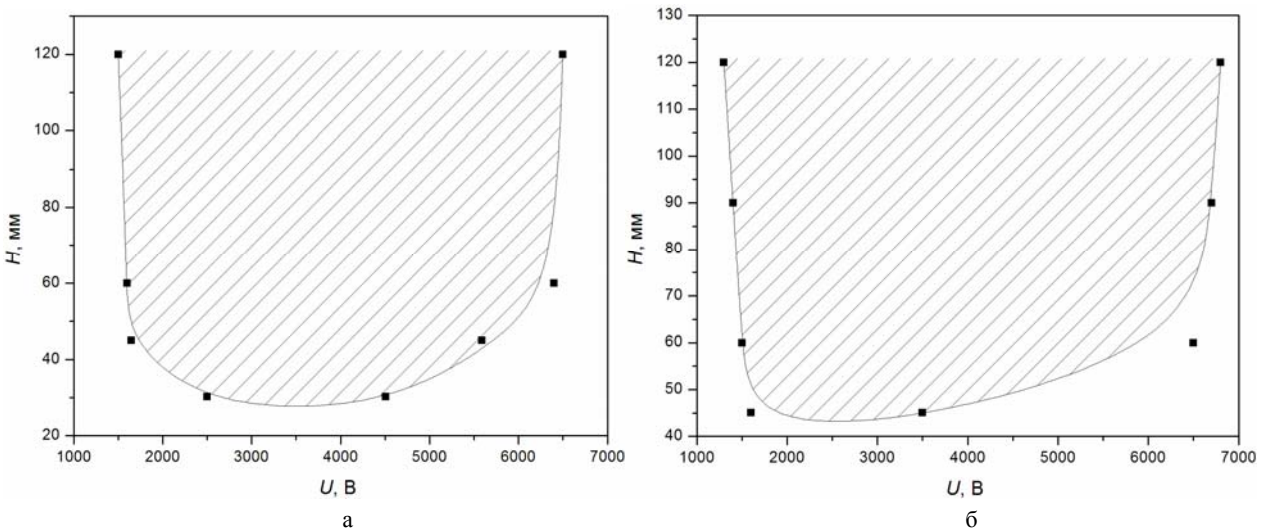
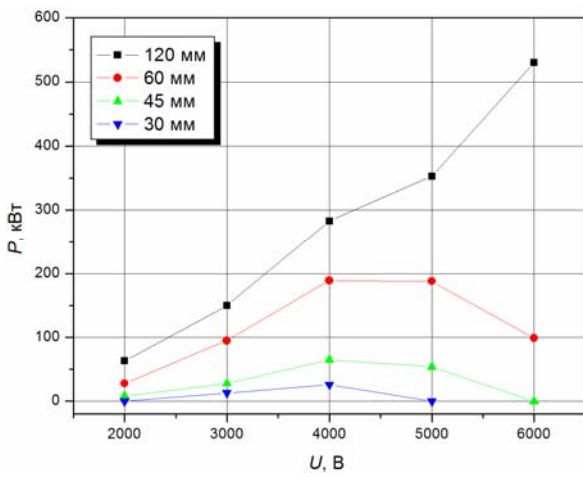
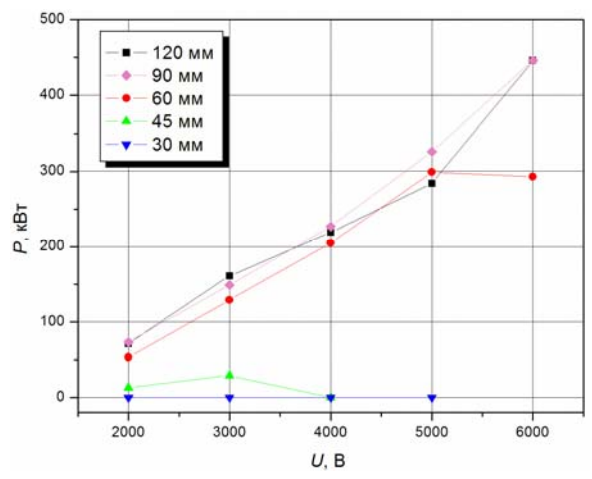


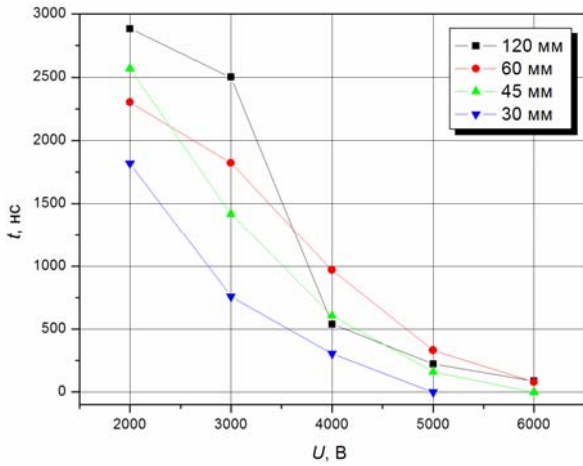
Рис. 3. Зависимость диапазона рабочего напряжения ВЧ-генератора от глубины полого катода: а – диэлектрическая вставка; б – проводящая вставка. Заштрихована область, в которой происходит генерация



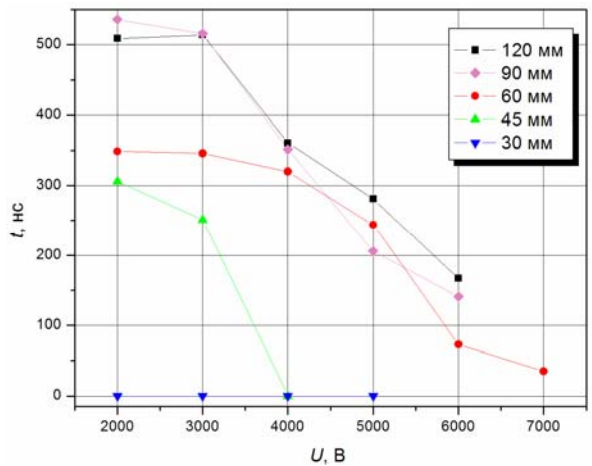
а



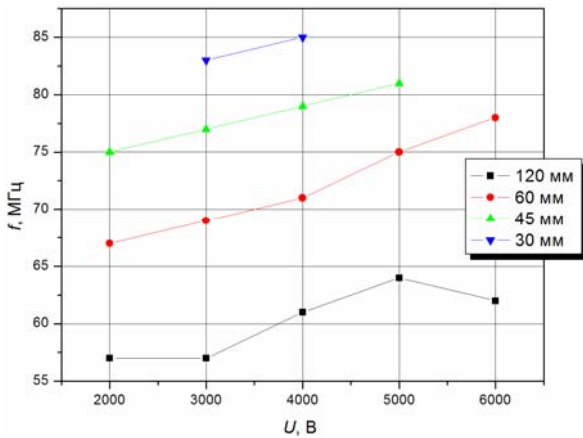
б



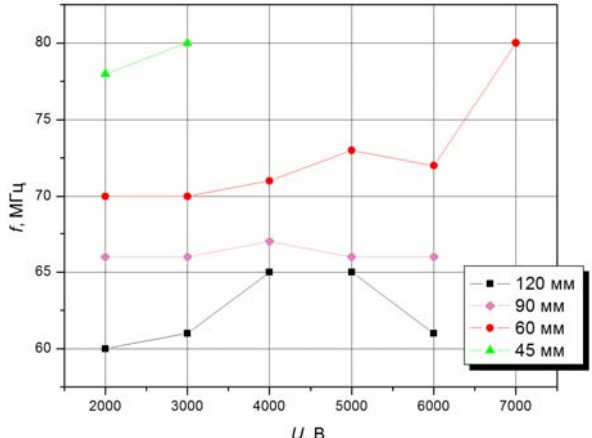
в



г



д



е

Рис. 4. Влияние глубины полового катода на характеристики (выходная действующая мощность; длительность генерации; частота генерации) ВЧ-генератора: а, в, д – диэлектрическая вставка; б, г, е – проводящая вставка

Таким образом, при разработке конструкции ВЧ-генератора на основе разряда с полым катодом с конкретными техническими характеристиками можно руководствоваться следующими установленными фактами. Для получения максимально возможной ВЧ-мощности необходимо, чтобы длина полости катода явно превышала его диаметр. Наличие диэлектриче-

ского дна полового катода может увеличить длительность генерации в несколько раз. Получить нужную частоту ВЧ-генерации можно путем варьирования не только диаметра (резкая подстройка), но и длины катодной полости (более плавная подстройка).

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 10-02-00137.

## Литература

1. Felsteiner J., Ish-Shalom S., Slutsker Ya. Z. Optimized performance of a powerful hollow-cathode RF oscillator // Journal of applied physics. 1998. Vol. 83, N 6. P. 2940.

2. Bliokh Yu. P., Felsteiner J., Slutsker Ya. Z., Vaisberg P. M. Characteristics of a High-Power RF Oscillator Based on a Pulsed Hollow-Cathode Discharge // IEEE Transactions on plasma science. 2001. Vol. 29, N 6. P. 895.

3. Вялых Д. В., Дубинов А. Е., Львов И. Л., Садовой С. А., Селемир В. Д. Генератор мощных высокочастотных импульсов на основе разряда с полым катодом // ПТЭ. 2005, № 1. С. 86.

4. Дубинов А. Е., Львов И. Л., Садовой С. А., Селемир В. Д., Вялых Д. В. Мощный импульсный высокочастотный генератор на основе разряда с полым катодом // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 4. С. 300.

5. Булычев С. В., Вялых Д. В., Дубинов А. Е., Жданов В. С. и др. Результаты исследований генераторов мощных ВЧ-импульсов на основе разряда с полым катодом // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 11. С. 1019.



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ «ГАММА-1» С МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОЙ ЛИНИЕЙ И ДИОДОМ

Д. О. Мансуров, М. А. Моисеевских, С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ завершены работы по созданию сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1] и проведена его экспериментальная отработка в режимах функционирования на вакуумную магнитоизолированную передающую линию (МИПЛ) и сильноточный вакуумный диод.

## Описание ускорителя «Гамма-1»

Система формирования высоковольтных импульсов ускорителя выполнена на базе двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) [2] с первоначальным накоплением энергии в четырех линиях с водяной изоляцией приблизительно равной электрической длины  $\sim 50$  нс. С целью уменьшения общей длины ускорителя линии уложены последовательно по радиусу в пределах одного осевого размера ( $\sim 1,8$  м). Зарядка ДСФЛ до рабочего напряжения 1 МВ за время  $\sim 900$  нс производится от двух параллельно включенных генераторов импульсного напряжения ГИН-1000. Коммутация ДСФЛ осуществляется с помощью 36 управляемых газонаполненных искровых разрядников, расположенных симметрично по азимуту на корпусе формирующей системы.

Предымпульсный коммутатор является неотъемлемой частью формирующей системы. Он непосредственно участвует в формировании выходного импульса и включается через 260 нс после срабатывания многоканального коммутатора ДСФЛ. Предымпульсный коммутатор содержит 6 газонаполненных искровых разрядников тригatronного типа.

Передающая линия с водяной изоляцией (ВПЛ) служит для транспортировки импульса с выхода формирующей системы к ускорительной трубке. Конструктивное исполнение линии – коаксиальное, в качестве изоляции используется деионизованная вода. Волновое сопротивление линии согласовано с выходным импедансом формирующей системы и составляет 2,9 Ом. Диаметр внешнего электрода линии равен 1,62 м.

Ускорительная трубка представляет собой последовательность чередующихся, соединенных друг с другом диэлектрических и металлических градиентных колец.

Ускорительная трубка с магнитоизолированной передающей линией и сильноточным вакуумным диодом служит для формирования электронного пучка, энергия которого конвертируется в мишени в импульс тормозного излучения. Внешний вид модуля показан на рис. 1.

Исследования проводились с двумя МИПЛ длиной 1,5 и 2,5 м с диаметрами внешнего и внутреннего электродов 200 и 168 мм соответственно. В экспериментах зазор между внутренним и внешним электродом МИПЛ устанавливался 16 мм с точностью 0,1 мм. В качестве нагрузки ускорителя использовался сильноточный вакуумный диод.

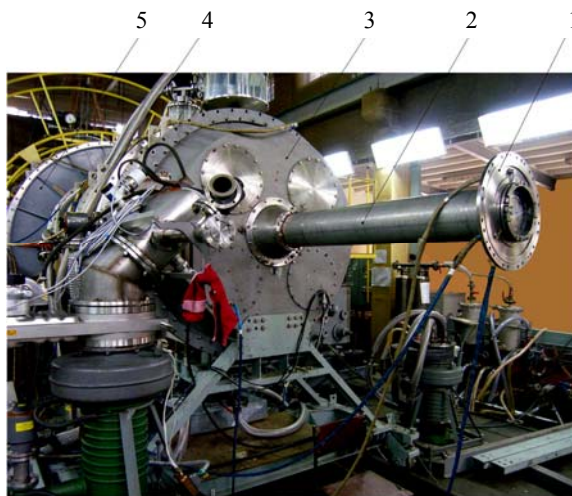


Рис. 1. Внешний вид импульсного сильноточного ускорителя электронов «Гамма-1» с магнитоизолированной передающей линией: 1 – сильноточный вакуумный диод; 2 – МИПЛ; 3 – ускорительная трубка; 4 – ВПЛ; 5 – ДСФЛ

Диаметр эмитирующей кромки катода составлял 168 мм. Катод изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Эмитирующая кромка катода после каждого рабочего включения ускорителя обрабатывалась механически для восстановления геометрических размеров. Ускоряющий зазор между катодной кромкой и мишенью устанавливался 10 мм с точностью 0,1 мм. По экономическим соображениям в исследованиях по отработке режимов работы сильноточного диода применялись мишени из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т диаметром 180 мм

и толщиной 0,9 мм. С высокоточным вакуумным диодом соединялась вакуумируемая измерительная камера, в которой на расстоянии 20 см от мишени устанавливалась матрица с детекторами ПСТ (из стекла марки ИС-7) для получения углового распределения тормозного излучения (ТИ). В качестве фильтра электронов, прошедших через мишень, использовались диски полиэтилена толщиной 9 и 12 мм при зарядном напряжении ДСФЛ 0,9 и 1 МВ соответственно. Для защиты матрицы с детекторами от металлических осколков мишени были установлены дополнительно несколько слоев кевлара.

Рабочий вакуум  $(6-9) \cdot 10^{-3}$  Па  $((5-7) \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.) в диоде, МИПЛ и измерительной камере обеспечивался диффузионным паромасляным агрегатом АВП-250 и контролировался ионизационным датчиком ПМИ-10-2, установленным вблизи ускорительного зазора.

### Система регистрации

Измерение зарядного напряжения ДСФЛ осуществлялось с помощью емкостного делителя напряжения, конструкция которого показана на рис. 2.

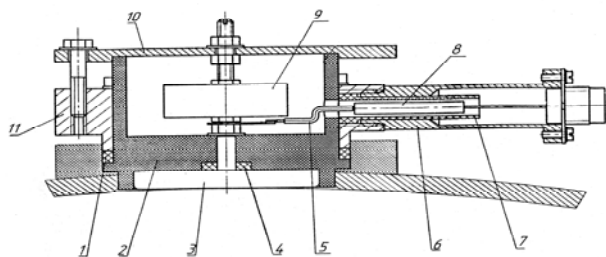


Рис. 2. Конструкция емкостного делителя напряжения: 1 – прокладка; 2 – изолятор; 3 – электрод; 4 – уплотнение; 5 – трубка; 6 – переходник; 7 – втулка; 8 – сопротивление; 9 – конденсатор; 10 – крышка; 11 – корпус

Электрод 3 вставляется в изолированное отверстие заземленного электрода ДСФЛ, тем самым, образуя емкость высоковольтного плеча между электродом делителя и высоковольтным электродом ли-

нии. Емкость низковольтного плеча представляет собой керамический конденсатор, с которого снимается сигнал через интегрирующее сопротивление.

Измерение напряжения в ВПЛ и ускорительной трубке проводится с помощью жидкостных омических делителей [3], конструкция которых показана на рис. 3.

В данном делителе реализованы две степени деления напряжения. Первая ступень на основе водного раствора соли КСl одной концентрации в обоих плечах делителя. Вторая ступень деления образована из резисторов ТВО-2.

Импульсы тока в ВПЛ регистрируются секционированными индукционными датчиками тока, которые размещались в специальном пазе прямоугольного сечения во внешнем электроде ВПЛ. Конструкция датчика показана на рис. 4.

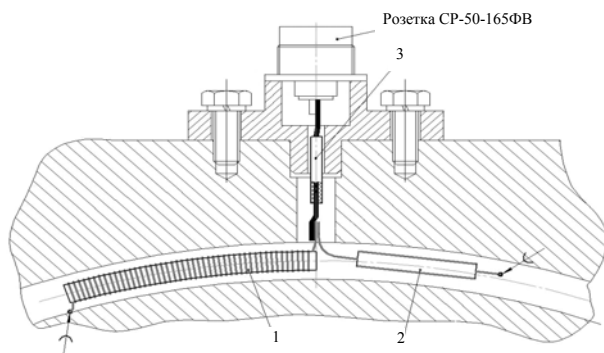


Рис. 4. Конструкция секционированного пояса Роговского: 1 – секционированный индукционный датчик тока; 2 – нагрузочное сопротивление; 3 – провод ПВ 1

Чувствительным элементом индукционного датчика тока является обмотка, в которой возбуждается Э. д. с. переменным магнитным полем измеряемого тока. Формирование выходного сигнала происходит на резистивной нагрузке датчика.

Импульсы тока в ускорительной трубке контролировались флюксометрами, расположенными симметрично по окружности одного радиуса с суммированием сигналов с каждого флюксометра по схеме рис. 5 и регистрацией одного суммарного сигнала.

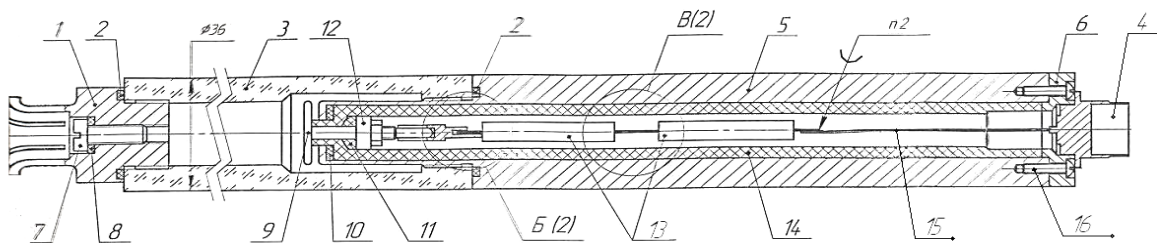


Рис. 3. Конструкция жидкостного омического делителя напряжения: 1 – цанга; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – соединительный разъем СР – 50 – 165 ФВ; 5 – корпус; 6 – втулка; 7 – винт; 8 – прокладка; 9 – электрод; 10 – прокладка; 11 – прокладка; 12 – шайба; 13 – резисторы ТВО – 2; 14 – изолятор; 15 – проводник; 16 – винт М3

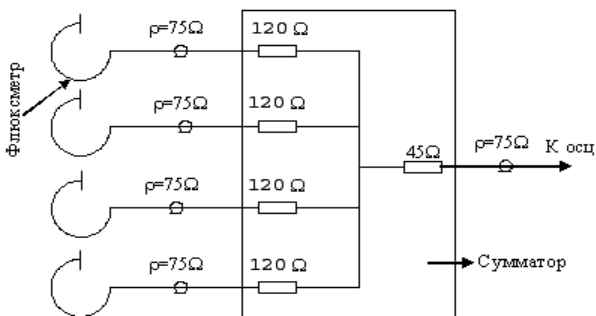


Рис. 5. Схема суммирования сигналов с флюксметров

Чувствительным элементом флюксметра является обмотка, в которой возбуждается э. д. с. переменным магнитным полем измеряемого тока.

На рис. 6 показано расположение датчиков на ускорителе, с помощью которых проводились измерения.

После каждого рабочего включения ускорителя вычислялись:

– запасенная в ДСФЛ электрическая энергия  $W_{ДСФЛ}$

$$W_{ДСФЛ} = C U_0^2 / 2, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $C$  – электрическая емкость ДСФЛ, Ф;  $U_0$  – напряжение зарядки ДСФЛ, В;

– мощность  $P_{ВПЛ}$  и энергия  $W_{ВПЛ}$  электрического импульса в ВПЛ

$$P_{ВПЛ} = U_{ВПЛ} I_{ВПЛ}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

$$W_{ВПЛ} = \int P_{ВПЛ} dt, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где  $U_{ВПЛ}$  – напряжение с резистивного делителя напряжения в середине ВПЛ, В;  $I_{ВПЛ}$  – ток с секционированного индукционного датчика тока в ВПЛ, А;

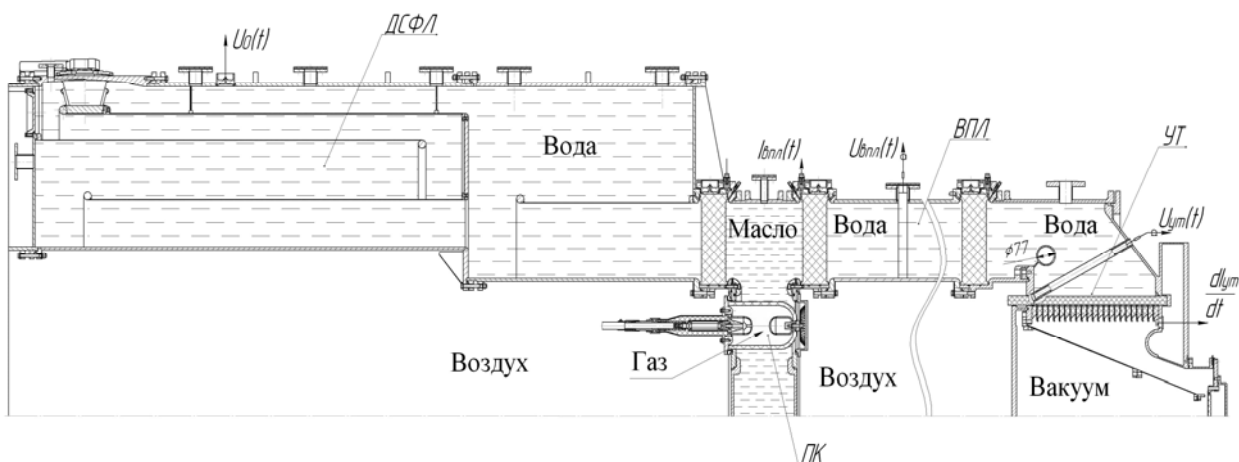


Рис. 6. Конструктивная схема высоковольтной части ускорителя «Гамма-1» и положение измерительных датчиков тока и напряжения

– напряжение на диоде  $U_D$  рассчитывалось по формуле

$$U_D = U_{УТ} - L dI_{УТ} / dt, \quad (4)$$

где  $L$  – расчетная индуктивность ускорительной трубки и магнитоизолированной линии;  $dI_{УТ} / dt$  – сигнал с дифференцирующего датчика тока расположенного в конце ускорительной трубки, А/с;  $I_{УТ}$  рассчитывался путем интегрирования сигнала  $dI_{УТ} / dt$  с дифференцирующего датчика тока.

– мощность  $P_{\Pi}$  и энергия  $W_{\Pi}$  электрического импульса в сильноточном вакуумном диоде

$$P_{\Pi} = U_D I_{УТ}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

$$W_{\Pi} = \int P_{\Pi} dt, \text{ Дж}, \quad (6)$$

где  $U_D$  – напряжение на вакуумном сильноточном вакуумном диоде, В;  $I_{УТ}$  – ток на выходе ускорительной трубки, А;

– коэффициент передачи энергии электрического импульса от предимпульсного коммутатора к диоду

$$\text{КПД} = \left( \frac{W_{\Pi}}{W_{ВПЛ}} \right) \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Мощность  $P_{\Pi}$  и энергию  $W_{\Pi}$  электрического импульса в сильноточном вакуумном диоде надо воспринимать как некоторые оценочные параметры, поскольку на данный момент измерение токов мегаамперного диапазона в конце МИПЛ вызывает некоторые трудности, связанные с процессом замагничивания МИПЛ и неоднородности формирования электронного пучка.

## Экспериментальные исследования на ускорителе «Гамма-1» и полученные результаты

В таблице представлены обработанные экспериментальные данные в трех режимах работы: I – без МИПЛ; II – с МИПЛ длиной 1,5 м; III – с МИПЛ длиной 2,5 м.

Таблица

Передача электрического импульса по ускорителю при зарядном напряжении формирующей системы 1 МВ

Наименование параметра	Значение		
	I	II	III
$W_{\text{ДСФЛ}}$ , кДж	120	120	120
$W_{\text{ВПЛ}}$ , кДж/ $P_{\text{ВПЛ}}$ , ТВт	106/2,0	109/2,2	107/2,1
$W_{\text{П}}$ , кДж/ $P_{\text{П}}$ , ТВт	90/1,7	70/1,5	54/1,4
$U_{\text{д}}$ , МВ	1,9	1,7	1,7
Максимальная доза ТИ, кР	1,03	0,75	0,75
КПД, %	84	64	50

На первом этапе, на ускорителе «Гамма-1» проводилась серия экспериментов без МИПЛ, т. е. ускорительная трубка нагружалась на высоковольтный вакуумный диод при зарядном напряжении ДСФЛ 0,9 и 1 МВ. На рис. 7 показаны зависимости мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде без МИПЛ от времени при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ.

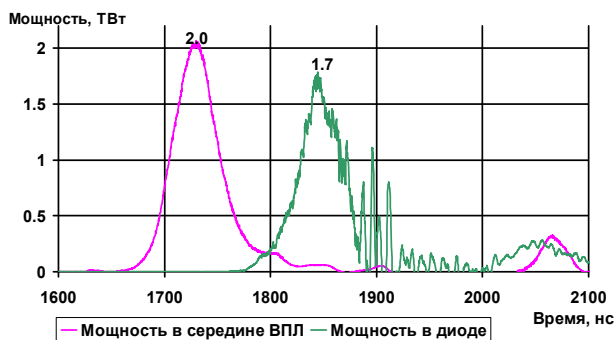


Рис. 7. Мощность электрического импульса по мере его прохождения по ускорителю «Гамма-1» при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ

Из рис. 7 видно, что максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ 2,0 ТВт больше, чем максимальное значение мощности в диоде 1,7 ТВт. Это непосредственно связано с потерями электрической энергии на индуктивности ускорительной трубки.

На рис. 8 представлены результаты измерений методом дозиметрии ИКС экспозиционной дозы ТИ на расстоянии 20 см от мишени, при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ. Черными точками указаны

места расположения детекторов ПСТ. Желтым цветом показана область, в которой экспозиционная доза отличается не более чем на 15 % от максимальной. Красным цветом показана область, в которой экспозиционная доза отличается не более чем на 30 % от максимальной.

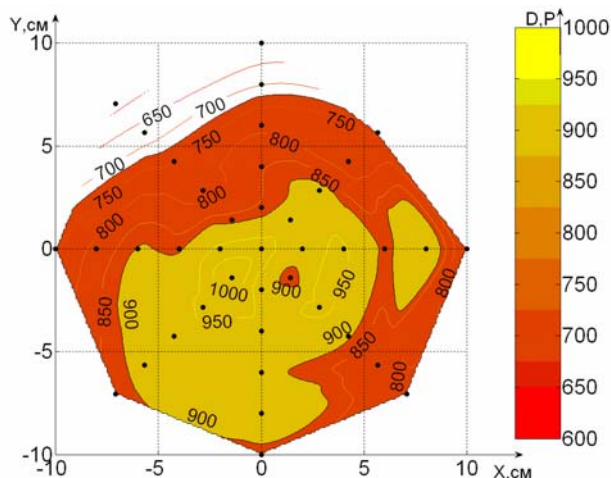


Рис. 8. Распределение экспозиционной дозы ТИ на расстояние 20 см от мишени без МИПЛ при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ

Из рис. 8 видно, что на площади матрицы с детекторами ПСТ (из стекла марки ИС-7) максимальное значение экспозиционной дозы ТИ составило 1030 Р.

На втором этапе, на ускорителе «Гамма-1» проводилась серия экспериментов с МИПЛ длиной 1,5 м и высоковольтным вакуумным диодом. Исследования проводились при зарядных напряжениях ДСФЛ 0,9 и 1 МВ.

В таблице приведены полученные значения мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде с МИПЛ длиной 1,5 м при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ. Максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ составило 2,2 ТВт, а максимальное значение мощности в диоде 1,5 ТВт. При зарядном напряжении 0,9 МВ, максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ практически не изменились по сравнению с экспериментами без МИПЛ, а максимальное значение мощности и энергии в диоде несколько уменьшилось по сравнению с выходными характеристиками ускорителя без МИПЛ. При этом КПД снизился с ~80–85 % до ~65–70 %. После проведения серии экспериментов с МИПЛ длиной 1,5 м была произведена ее разборка, в результате осмотра которой не было обнаружено видимых следов пробоев, что свидетельствует о достоверности полученных значений мощности  $P_{\text{П}}$  и энергии  $W_{\text{П}}$  электрического импульса в высоковольтном вакуумном диоде.

Далее эксперименты продолжались с вакуумной магнитоизолированной передающей линией длиной 2,5 м. В таблице приведены полученные значения мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде при зарядном напряжении 1 МВ. Макси-

мальное значение мощности в диоде с МИПЛ длиной 2,5 м отличается от максимального значения мощности с МИПЛ длиной 1,5 м, поскольку в конце импульса произошел пробой в УТ. В импульсах с зарядным напряжением 0,9 МВ таких существенных отличий для максимальных значений мощности в диоде с разными МИПЛ не наблюдалось и КПД сохранялся на уровне 65–70 %. После проведения серии экспериментов с МИПЛ длиной 2,5 м была произведена ее разборка, в результате которой не было обнаружено видимых следов пробоев.

Всего в рамках этой работы было проведено 32 рабочих включения ускорителя «Гамма-1». По результатам проведенных включений можно сделать вывод, что при работе ускорителя без МИПЛ передается ~ 80–85 % энергии электрического импульса от предимпульсного коммутатора к диоду, с МИПЛ длиной 1,5 м и длиной 2,5 м ~ 65–70 % энергии. Основные потери энергии электрического импульса в режиме работы ускорителя с МИПЛ связаны, по-видимому, с замагничиванием МИПЛ.

### Заключение

На импульсном сильноточном ускорителе электронов «Гамма-1» проведены экспериментальные исследования по передаче энергии к диодной нагрузке по МИПЛ с «холодным» импедансом 10,4 Ом, длиной 1,5 и 2,5 м и диаметрами внутренних и внешних

электродов 168 и 200 мм. Экспериментально установлено, что выходные характеристики ускорителя, работающего с МИПЛ, незначительно снижаются по отношению к выходным характеристикам ускорителя работающего без МИПЛ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования исследованных МИПЛ для передачи по ним энергии к диодной нагрузке.

### Литература

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Состояние работ по созданию ускорителя с энергией электронов ~ 2 МэВ, током пучка ~ 1 МА в импульсе длительностью ~ 60 нс // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. 11–24 марта 2006 года (сборник докладов). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 145–149.
2. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et. al. Pulsed Power Electron Accelerators with the Forming Systems Based on Stepped Transmission Lines // 9-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS-92, Washington, DC. May 25–29, 1992. Vol. 1. P. 505–510.
3. Герасимов А. И. Делитель высоковольтного импульсного напряжения с жидкостными резисторами // Приборы и техника эксперимента. № 2, 1993. С. 96–100.

# КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПРОВОЛОКЕ

Д. А. Маслов, Ю. Б. Кудасов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В результате достаточно быстрого развития молекулярной наноэлектроники в последние годы в руках исследователей оказались инструменты для изучения электронного транспорта через одиночные молекулы и кластеры. Заметную роль при исследовании этих процессов играет сканирующая туннельная микроскопия и развитие устройств с наноконтактами.

При протекании электрического тока через молекулу возникает ряд новых явлений, и, в частности, отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС) [1]. На основе этого эффекта могут быть построены различные устройства молекулярной электроники, такие как транзисторы, коммутаторы, элементы памяти и логические элементы. Очень важным обстоятельством является то, что этот эффект наблюдается при комнатных температурах, а характерная величина напряжения может составлять 1 В [1].

В настоящее время последовательное объяснение эффекта ОДС отсутствует. Рассматриваются различные механизмы его возникновения: деформация молекулы, изменение электронного спектра молекулы под действием сильного внешнего электрического поля и т. д. [2].

Электронные состояния молекулы, присоединенной к наноконтактам, сравнительно слабо связаны с электронами проводимости наноконтактов. В этих условиях, сила кулоновских корреляций при транспорте заряда через молекулу оказывается значительно выше, чем в металле, поэтому существование участков вольт-амперной характеристики с ОДС может быть объяснено наличием сильных электронных корреляций.

В предыдущей работе [3] для анализа протекания тока в режиме сильных корреляций была предложена модель молекулы, состоящая из двух уровней, вырожденных по спину. Гамильтониан изолированной молекулы имел вид

$$H_M = \sum_{\substack{i=1,2 \\ \sigma=\uparrow,\downarrow}} \varepsilon_i n_{i\sigma} + U \sum_{i=1,2} n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + V \sum_{\sigma,\sigma'=\uparrow,\downarrow} n_{1\sigma} n_{2\sigma'}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  – энергия  $i$ -ого уровня,  $n_{i\sigma}$  – оператор числа частиц на  $i$ -ом уровне со спином  $\sigma$ ,  $U$  и  $V$  – параметры кулоновского взаимодействия. Функцию Грина (ФГ), соответствующую данному молекулярному гамильтониану (1), можно вычислить точно посредством метода уравнений движения [4, 5].

Затем, в статье [3] был применен феноменологический прием, заключающийся в том, что функция Грина системы «молекула + контакты» была опреде-

лена при помощи стандартной теории возмущений, где оператор взаимодействия молекулы с контактами рассматривался как возмущение к невозмущенному состоянию молекулы, определяемому выражением (1). Однако, одним из условий применимости стандартной теории возмущений для функций Грина является требование квадратичности гамильтониана по операторам рождения и уничтожения, которое здесь явно не выполняется.

В настоящей работе для описания эффекта ОДС используется модель магнитной молекулы, предложенная в статье [6]. Здесь гамильтониан системы имеет вид

$$H = \sum_{\sigma} \varepsilon_{\sigma} n_{\sigma} + U n_{\uparrow} n_{\downarrow} + \sum_{\sigma, \mathbf{k} \in L, R} \varepsilon_{\mathbf{k}\sigma} c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\sigma} + \sum_{\sigma, \mathbf{k} \in L, R} \left( t_{\mathbf{k}\sigma} c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + \text{H.c.} \right), \quad (2)$$

где две последние суммы – гамильтониан контактов и оператор взаимодействия молекулы с контактами, соответственно: волновые вектора электронов проводимости  $\mathbf{k}$  относятся к левому или правому контакту (индексы  $L$  и  $R$ ).

Модель (2) представляет собой простейшую двухуровневую систему: оба уровня невырождены. Ее можно рассматривать как модель магнитной одноуровневой молекулы (состояния с разными спинами имеют разные значения энергии и разные интегралы переноса заряда из молекулы в контакт). При этом число возможных состояний оказывается в 4 раза меньше, чем в [3], что существенно упрощает решение.

Для системы с гамильтонианом (2) имеется приближенное решение [6] для ФГ системы, полученное путем пренебрежения функциями Грина более высокого порядка. Важным аспектом задачи является то, что ФГ явно зависит от чисел заполнения молекулярных уровней. Однако, для их нахождения равновесная функция распределения неприменима ввиду неравновесности самой ситуации пропускания тока через систему. Методом последовательного дифференцирования ФГ молекулы по первому и второму аргументам были получены тождества, связывающие ее с ФГ контактов, считающихся равновесными. На основе полученных тождеств записана квазиравновесная функция распределения электронов в молекуле.

Построение вольт-амперной характеристики было выполнено в рамках формулы Ландауэра [6, 7, 8].



Таким образом, в рамках простой двухуровневой модели [6], с различной связью уровней с контактами, можно исследовать корреляционный механизм ОДС. Следует отметить, что здесь, также как и в работе [3], необходимым условием возникновения ОДС является различие в интегралах переноса заряда для различных спинов ( $t_{k\uparrow} \neq t_{k\downarrow}$ ), т. е. один из уровней является почти локализованным, а другой сильно связан с контактами. Локализованный уровень должен находиться по энергии дальше от невозмущенного уровня Ферми контактов, чем делокализованный.

Работа поддержана РФФИ (проекты 08-02-97018-р-поволжье-а и 08-02-00508-а), МНТЦ (проект 3501) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Один из авторов (Д. А. М.) выражает признательность фонду «Династия».

### Литература

1. Cheng J., Wang W., Reed M. A. et al. Room-temperature negative differential resistance in nanoscale molecular junctions // *Applied Physics Letters*. 2000. Vol. 77. P. 1224.

2. Datta S. Electrical resistance: an atomistic view // *Nanotechnology*. 2004. Vol. 15. P. S433.

3. Кудасов Ю. Б. Корреляционный механизм отрицательного дифференциального сопротивления при протекании туннельного тока через проволоку // *Известия РАН. Серия физическая*. 2008. Т. 72. С. 189.

4. Зубарев Д. Н. Двухвременные функции Грина в статистической физике // *УФН*. 1960. Т. LXXI. С. 71.

5. Hubbard J. Electron correlations in narrow energy bands // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1963. Vol. 276. P. 238.

6. Meir Y., Wingreen N. S., Lee P. A. Transport through a strongly interacting electron system: theory of periodic conductance oscillations // *Physical Review Letters*. 1991. Vol. 66. P. 3048.

7. Meir Y., Wingreen N. S. Landauer formula for the current through an interacting electron region // *Physical Review Letters*. 1992. Vol. 68. P. 2512.

8. Jauho A. P., Wingreen N. S., Meir Y. Time-dependent transport in interacting and noninteracting resonant-tunneling system // *Physical Review B*. 1994. Vol. 50. P. 5528.



# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ ЧИРПИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И. Н. Воронич, Б. Г. Зималин, А. И. Кедров, Д. В. Маслов, С. В. Мочкаев, В. В. Романов,  
Н. Н. Рукавишников, А. В. Савкин, С. А. Сухарев, О. В. Триканова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В современной лазерной физике существуют два основных принципа построения сверхмощных лазерных систем с ультракороткой длительностью импульса излучения: традиционная схема прямого усиления чирпированного лазерного импульса [1–3] и схема на основе параметрических усилителей (см. рис. 1) [4, 5]. К преимуществам схемы параметрического усиления, по сравнению с традиционной, можно отнести большую спектральную ширину полосы усиления, что позволяет получить меньшую длительность скомпрессированного импульса и достичь петаваттного уровня мощности при меньшем значении выходной энергии, а также более высокое значение контраста сверхкороткого импульса на мишени.

Исследования показали, что в качестве нелинейных элементов для параметрических усилителей можно выбрать кристаллы дигидрофосфата калия (DKDP) [6]. Обуславливается это тем, что при выполнении условий сверхширокополосного синхронизма максимальная ширина полосы усиления сигнала в кристалле DKDP при интенсивности излучения накачки  $I_{\text{нак.}} \sim (1-4) \text{ ГВт/см}^2$  составляет величину  $(2300-2500) \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_0 \approx 910 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda \approx 200 \text{ нм}$ ), что позволяет усиливать импульсы длительностью  $\approx 15 \text{ фс}$ . При этом накачка параметрических усилителей может производиться излучением лазера на неодимовом стекле, преобразованным во вторую гармонику ( $\lambda_{1\omega} = 1054 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\text{нак.}} = \lambda_{2\omega} = 527 \text{ нм}$ )[5].

При параметрическом усилении света входной сигнал на частоте  $\nu_{\text{сиг.}}$  подается на нелинейный кристалл вместе с интенсивной волной накачки  $\nu_{\text{нак.}}$ , причем  $\nu_{\text{нак.}} > \nu_{\text{сиг.}}$  [4].

Усиление сигнальной волны происходит за счет ее нелинейного взаимодействия с волной накачки (энергия волны накачки перекачивается в энергию сигнальной и, так называемой, холостой волны). Перекачка энергии происходит с соблюдением законов сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega_{\text{нак.}} = \hbar\omega_{\text{сиг.}} + \hbar\omega_{\text{хол.}}, \quad \hbar\mathbf{k}_{\text{нак.}} = \hbar\mathbf{k}_{\text{сиг.}} + \hbar\mathbf{k}_{\text{хол.}},$$

где  $\mathbf{k}_{\text{нак.}}$ ,  $\mathbf{k}_{\text{сиг.}}$ ,  $\mathbf{k}_{\text{хол.}}$  – волновые вектора волны накачки, сигнальной (усиливаемой) волны и холостой волны.

Таким образом, процесс параметрического усиления является трехволновым. Из закона сохранения энергии и импульса следует, что усиление входной сигнальной волны с частотой  $\omega_{\text{сиг.}}$  сопровождается генерацией «холостой» волны на частоте  $\omega_{\text{хол.}} = \omega_{\text{нак.}} - \omega_{\text{сиг.}}$ . То есть исчезает один фотон накачки и генерируются фотоны сигнальной и «холостой» волн.

В работах [6] показано, что при накачке нелинейных кристаллов дигидрофосфата калия (DKDP) излучением второй гармоники неодимового лазера ( $\lambda_{\text{нак.}} = 527 \text{ нм}$ ) условие сверхширокого синхронизма выполняется для  $\lambda_{\text{сигн.}} \approx 910 \text{ нм}$ . Длина волны холостого излучения при этом  $\lambda_{\text{хол.}} \approx 1250 \text{ нм}$ .

Исходя из закона сохранения энергии можем определить предельный КПД параметрического усиления, когда вся энергия волны накачки перекачивается в энергию сигнальной и холостой волн:

$$\eta = \frac{\hbar\omega_{\text{сиг.}}}{\hbar\omega_{\text{нак.}}} = \frac{\lambda_{\text{нак.}}}{\lambda_{\text{сигн.}}}. \text{ Предельный КПД параметрического}$$

усиления, при  $\lambda_{\text{сигн.}} = 911 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\text{нак.}} = 527 \text{ нм}$ , составит  $\eta_{\text{пред.}} = 57,8 \%$ .

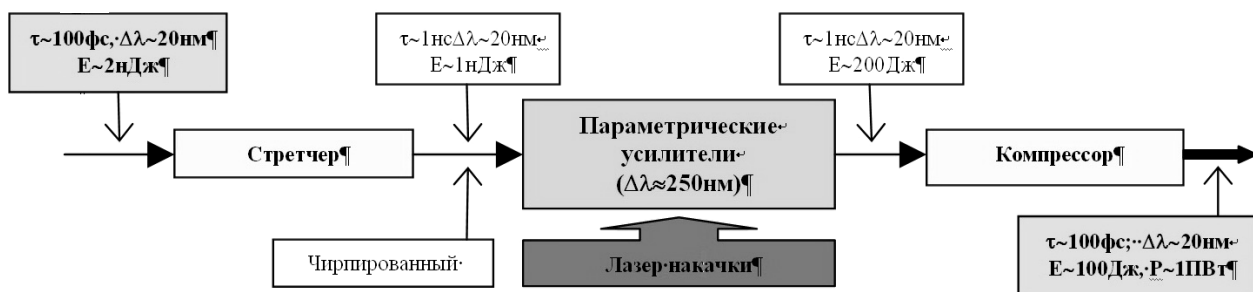


Рис. 1. Принцип построения систем на основе параметрического усиления

В случае точного фазового синхронизма, в приближении взаимодействия плоских волн, параметрическое усиление описывается следующими уравнениями [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial z} = \gamma A_2 A_3; \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} = \gamma A_1 A_3; \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} = -\gamma A_1 A_2. \end{cases}$$

Здесь  $A_1, A_2, A_3$  – амплитуды сигнальной, холостой волны и накачки,  $z$  – длина кристалла;  $\gamma$  – коэффициент усиления,  $\gamma = d_{eff} \sqrt{2 \frac{\omega_s \omega_i I_p}{\epsilon_0 n_s n_p n_i c^3}}$  где  $I_p$  – интенсивность излучения накачки,  $d_{eff}$  – коэффициент нелинейности,  $\omega_s$  – частота сигнальной волны,  $\omega_i$  – частота холостой волны,  $n_s, n_p, n_i$  – коэффициенты преломления нелинейного кристалла,  $c$  – скорость света.

Для лучшего понимания процесса параметрического усиления света, в приближении плоских волн, с помощью компьютерной модели, основанной на системе дифференциальных уравнений, а так же в приближении слабого сигнала (для проверки) был выполнен расчет интенсивности усиленной сигнальной волны с  $\lambda_{сигн.} = 911$  нм, интенсивности холостой волны с  $\lambda_{хол.} = 1250$  нм и интенсивности волны накачки с  $\lambda_{нак.} = 527$  нм. Входными параметрами являлись: интенсивность волны накачки  $I_{нак.} = 1$  ГВт/см<sup>2</sup>, интенсивность входной сигнальной волны  $I_{вх. сигн} = 0,01$  ГВт/см<sup>2</sup>, длина кристалла ( $t_{кр.}$ ) от 0 до 7 см. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Принцип параметрического усиления широкополосных chirпированных лазерных импульсов в нелинейных кристаллах DKDP был реализован совместно с Институтом Прикладной Физики РАН (ИПФ РАН) при создании петаваттного канала действующей в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки «Луч» [7, 8], на которой и выполнялась экспериментальная часть работы.

Структурная схема лазерной части установки приведена на рис. 3.

Лазерная часть установки состоит из следующих основных систем:

• Стартовой системы, в которой происходит генерация ультракороткого ( $\tau \sim 50$  фс) лазерного импульса, растяжение его до длительности  $\tau \approx 1$  нс и усиление в предварительных каскадах параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2. Импульс излучения с выхода стартовой системы с энергией  $E_{вых.} \approx (50-100)$  мДж и частотой следования 2 Гц может быть скомпрессирован, после чего, мощность его составит  $P_{вых., 1} \approx 0,5$  ТВт. В штатном режиме работы он подается на вход следующей, 100-тераваттной системы.

• 100-тераваттной системы, обеспечивающей параметрическое усиление импульса с выхода стартовой системы до энергии  $E_{вых., 2} \approx (10-15)$  Дж, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка  $P_{вых., 2} \approx (100-200)$  ТВт.

• Петаваттной системы, обеспечивающей параметрическое усиление chirпированного импульса с выхода предыдущей системы до энергии  $E_{вых., 3} \approx 100$  Дж, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка  $P_{вых., 3} \approx (1-2)$  ПВт.

Задающий генератор фемтосекундных лазерных импульсов (ЗГ-фс) на  $\text{Cr} : \text{Fg}$  работает по принципу пассивной синхронизации мод резонатора за счет образования в активном элементе наведенной керровской линзы [3]. На выходе ЗГ-фс импульс излучения является спектрально ограниченным ( $\lambda = 1250$  нм,  $\Delta\lambda \approx 60$  нм,  $\tau \approx 40$  фс). С выхода ЗГ-фс импульс поступает на вход стретчера, в котором происходит удлинение импульса до  $\tau_{0,5} \approx 0,5$  нс и «упорядочение» его спектра.

Лазерный импульс с выхода стретчера подается на вход системы предварительного параметрического усиления. Источником накачки предварительных каскадов параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2 является лазерная система на  $\text{YLF} : \text{Nd}$  с преобразованием длины волны излучения во вторую гармонику ( $\lambda_{2\omega} = 527$  нм,  $E_{2\omega} \approx 1$  Дж,  $\tau_{имп.} \approx 1,5$  нс), работающая в частотном режиме (2 Гц) [10, 11].

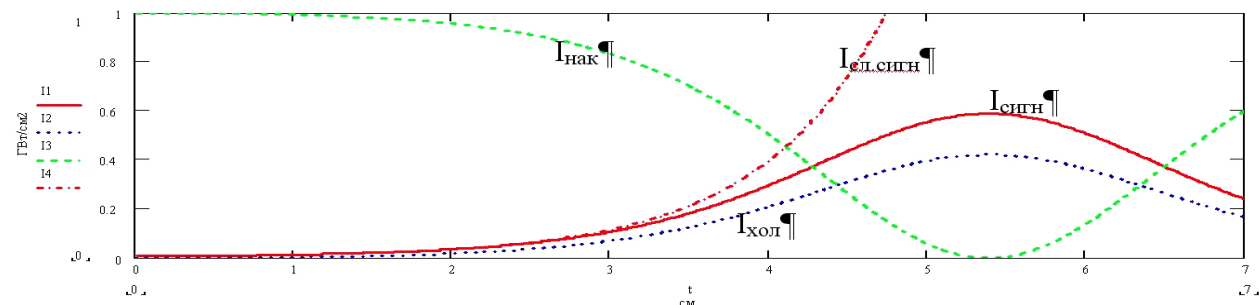


Рис. 2. Зависимости интенсивностей сигнальной волны ( $I_{сигн.}$ ), холостой волны ( $I_{хол.}$ ) и волны накачки ( $I_{нак.}$ ) от длины кристалла DKDP при  $I_{вх. сигн.} = 0,01$  ГВт/см<sup>2</sup> кривая  $I_{сл. сигн.}$  – интенсивность сигнальной волны в приближении слабого сигнала

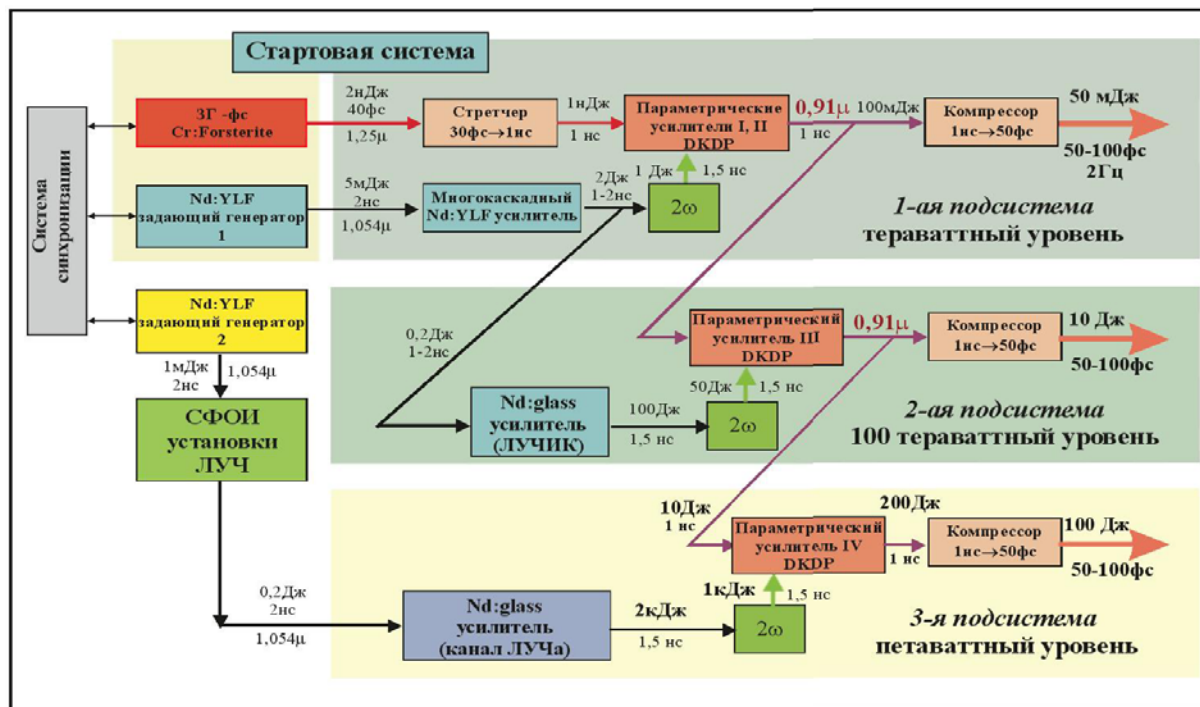


Рис. 3. Принцип построения систем на основе параметрического усиления [9]

Нелинейные элементы ПАУ-1 и ПАУ-2 изготовлены из кристаллов DKDP и имеют длину 70 мм, апертуру  $36 \times 30$  мм, степень дейтерирования 88,7%. Первый параметрический усилитель ПАУ-1 работает в двухпроходном режиме. На выходе ПАУ-2 энергия достигала  $\approx 80\text{--}90$  мДж при  $E_{\text{нак.}} \approx 0,8$  Дж. Полный коэффициент усиления  $\sim 10^8$ . Фото ПАУ-1 приведено на рис. 4.

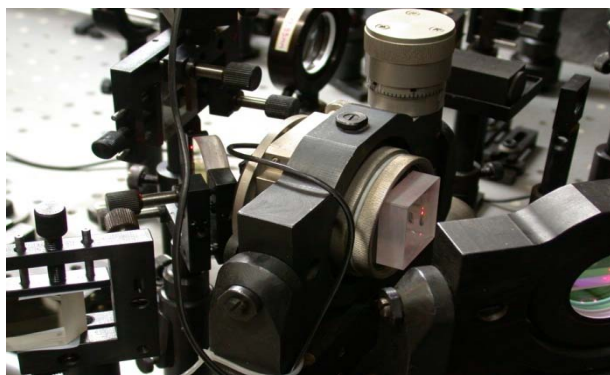


Рис. 4. Выходной параметрический усилитель ПАУ-1

Источником накачки широкоапертурного ( $\varnothing_{\text{св}} = 100$  мм) силового каскада параметрического усиления ПАУ-3 является лазер на неодимовом фосфатном стекле с выходной энергией  $E_{1\omega} \approx 120$  Дж при длительности импульса  $\tau_{0,5} \approx 1$  нс, излучение которого также преобразуется во вторую гармонику ( $E_{2\omega} \approx 60$  Дж). Входным сигналом для этого лазера является часть излучения лазера накачки параметрических усилителей стартовой системы с энергией  $E_{\text{вх.}} \approx (0,1\text{--}0,2)$  Дж.

Силовой каскад параметрического усиления ПАУ-3 изготовлен из кристалла DKDP со степенью дейтерирования 87%, диаметром световой апертуры 100 мм. Толщина кристалла 65 мм. При энергии накачки  $E_{2\omega} \approx 70$  Дж была получена энергия параметрически усиленного импульса  $E_{\text{чирп.}} \approx 16$  Дж. Максимальный физический КПД (эффективность) параметрического усилителя, определяемый как  $\eta = E_{\text{вых. сигн.}}/E_{\text{вх. } 2\omega}$  составил 27% по энергии. Спектральный состав излучения соответствовал длительности импульса 50 фс. После компрессии длительность лазерного импульса составила  $\tau \approx 45$  фс при энергии  $E_{\text{вых.}} \approx 9$  Дж, мощность лазерного излучения составила  $P_{\text{вых.}} \approx 200$  ТВт.

Для накачки выходного параметрического усилителя ПАУ-4 световым диаметром 200 мм используется преобразованный во вторую гармонику импульс излучения с энергией  $E_{2\omega} \approx (0,8\text{--}1)$  кДж, при длительности импульса  $\tau_{0,5} \approx 3$  нс с выхода лазерного канала установки «Луч».

Выходной параметрический усилитель ПАУ-4 предназначен для получения chirпированного импульса с энергией  $E_{\text{чирп.}} \approx (100\text{--}200)$  Дж, что после компрессии обеспечит мощность лазерного излучения на выходе установки  $P_{\text{вых.}} \sim 1$  ПВт ( $E_{\text{вых.}} \approx 50\text{--}100$  Дж,  $\tau_{\text{имп.}} \approx 50\text{--}100$  фс). Фото ПАУ-4 приведено на рис. 5.

Входным сигналом ПАУ-4 является выходной пучок силового параметрического усилителя ПАУ-3 ( $\lambda_{\text{сигн.}} = 911$  нм) с энергией  $E_{\text{вх.}} \approx (1\text{--}5)$  Дж.

Специально разработанная система синхронизации прихода лазерных импульсов накачки и сигнала обеспечивала временную точность их совмещения на входе в ПАУ-1, ПАУ-2 и ПАУ-3 не хуже  $\Delta t \approx 200$  пс, а на входе в ПАУ-4 в диапазоне  $\Delta t \approx (0,05\text{--}1,5)$  нс.

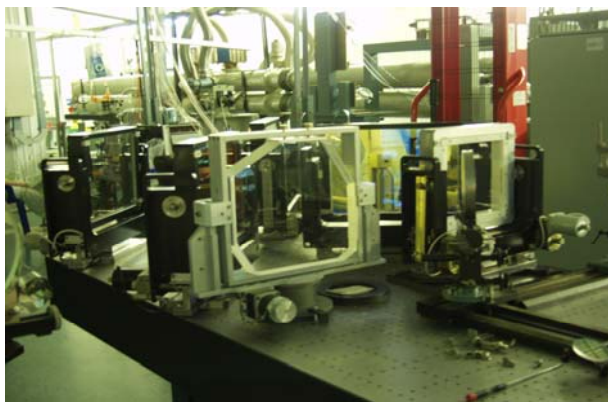


Рис. 5. Выходной параметрический усилитель ПАУ-4

На стартовой части установки, в каскадах предварительного параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2, был проведен ряд экспериментов. Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов от энергии импульсов накачки при неточности синхронизации  $\Delta t = 0, 100, 200, 300$  пс представлены на рис. 6.

Измерение временной рассинхронизации чирп-импульса и импульса накачки производились с помощью осциллограмм сигнального импульса и импульса накачки, представленных на рис. 7, 8.

Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов

в выходном каскаде параметрического усиления от энергии импульсов накачки представлены на рис. 9, 10.

Экспериментальные и расчетные временные формы чирпированных импульсов, усиленные в выходном каскаде параметрического усиления ПАУ-4, представлены на рис. 11, 13 и 12, 14 соответственно.

С помощью компьютерной модели можно с приемлемой точностью рассчитать энергию параметрически усиленного лазерного импульса. Так на рис. 15 представлены расчетные зависимости выходной энергии ПАУ-4 от входной при различных энергиях накачки, где  $\tau_{0,5 \text{ накл.}} = 3$  нс,  $\tau_{0,5 \text{ сигн.}} = 0,5$  нс,  $L_{\text{кр.}} = 5,5$  см.

На рис. 16 представлена расчетная зависимость энергии на выходе из ПАУ-4 при рассинхронизации импульсов от 0 до 1000 пс, при накачке 1600 Дж и входном сигнале 2 Дж.

Для понимания влияния неоднородности распределения энергии в ближней зоне сигнального пучка и пучка накачки на входе в ПАУ-4 на неоднородность сигнальной волны на выходе ПАУ-4 проведено две серии расчетов. В первой серии задавалась неоднородность распределения энергии в ближней зоне сигнального пучка при однородной в пучке накачки. Полученные результаты приведены на рис. 17. Иная картина наблюдается при изучении влияния неоднородности распределения энергии в ближней зоне пучка накачки на неоднородность распределения энергии в ближней зоне усиленного сигнального пучка (вторая серия расчетов) – рис. 18.

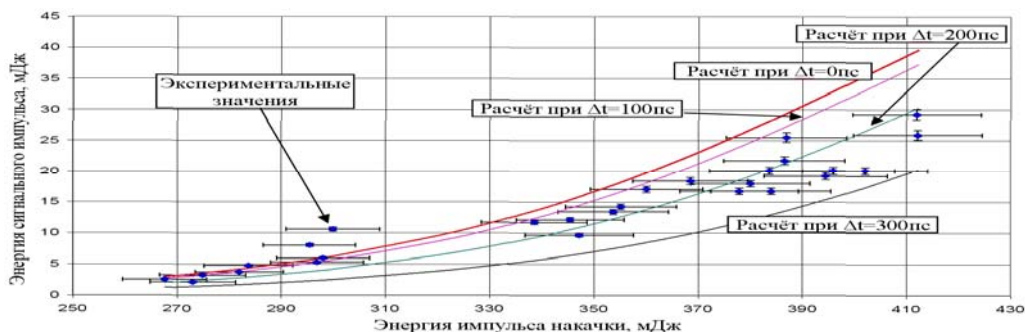


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов в каскадах предварительного параметрического усиления от энергии импульсов накачки при неточности синхронизации  $\Delta t = 0, 100, 200, 300$  пс, где точки – экспериментальные значения, сплошные линии – расчетные



Рис. 7. Осциллограмма сигнального импульса и импульса накачки ( $2\omega$ ). Считаем данную синхронизацию импульсов по времени точной



Рис. 8. Осциллограмма сигнального импульса и импульса 3Г YLF:Nd ( $1\omega$ ) в том же опыте



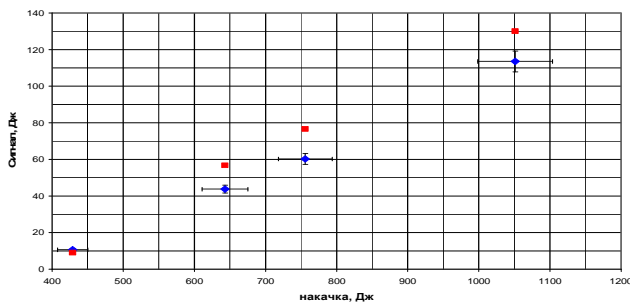


Рис. 9.

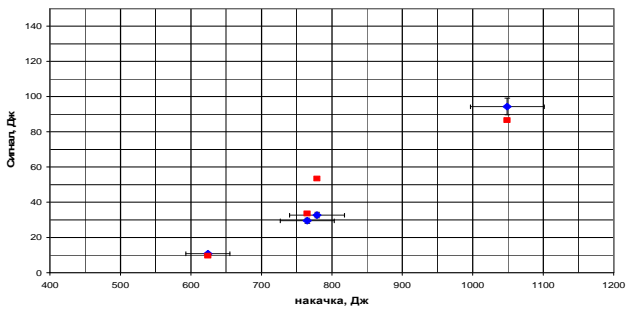


Рис. 10.

Экспериментальная и расчетная зависимость чирп-импульса на выходе из ПАУ-4 от накачки, при  $\Delta t \approx (0-1)$  нс (рис. 9) и  $\Delta t \approx 1,3$  нс (рис. 10), относительные погрешности при измерении энергии составляют 5%: ромбы – экспериментальные точки, квадраты – расчетные

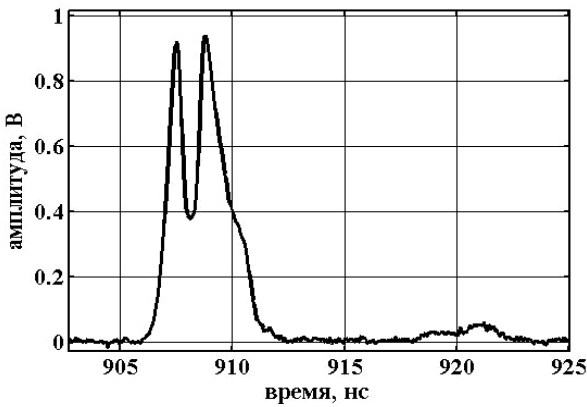


Рис. 11. Экспериментальный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ( $\Delta t \approx 0$  нс)

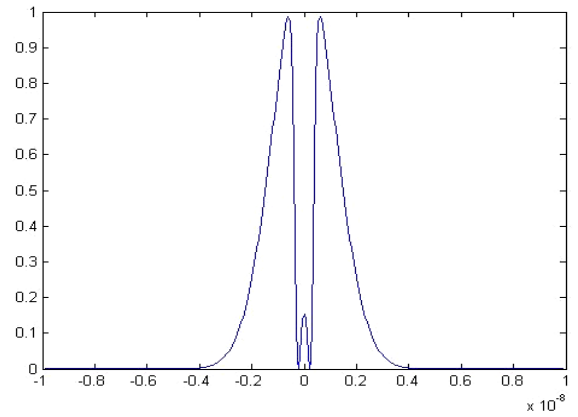


Рис. 12. Расчетный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ( $\Delta t = 0$  нс)

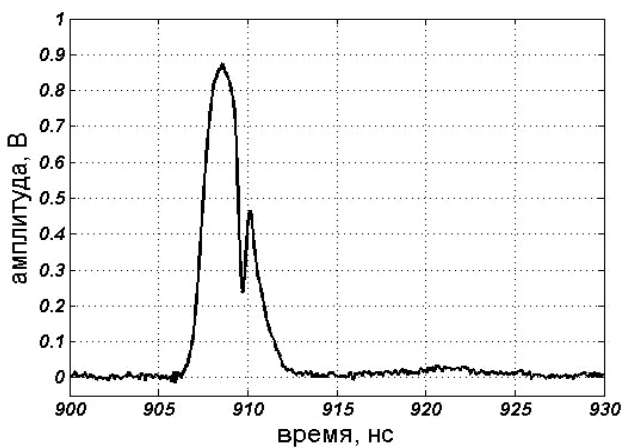


Рис. 13. Экспериментальный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ( $\Delta t \approx 1,3$  нс)

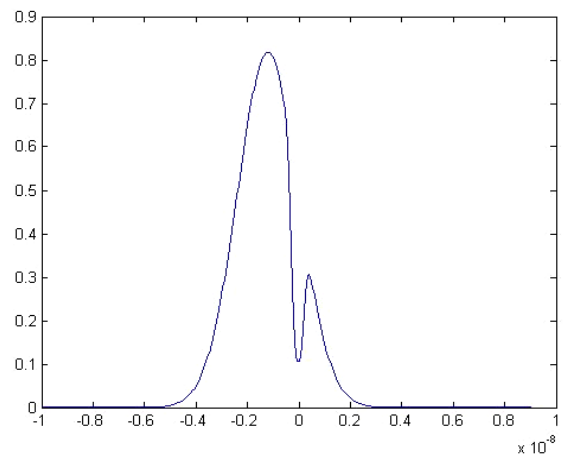


Рис. 14. Расчетный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ( $\Delta t = 1,3$  нс)

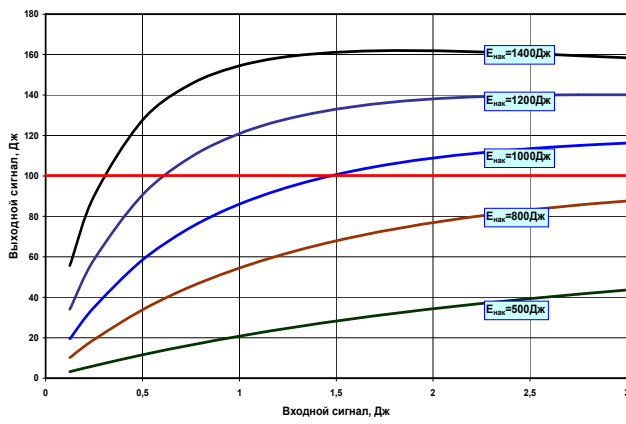


Рис. 15. Расчетные зависимости выходной энергии ПАУ-4 от входной при различных энергиях накачки, где  $\tau_{0,5 \text{ накл}} = 3 \text{ нс}$ ,  $\tau_{0,5 \text{ сигн}} = 0,5 \text{ нс}$ ,  $L_{\text{кр}} = 5,5 \text{ см}$

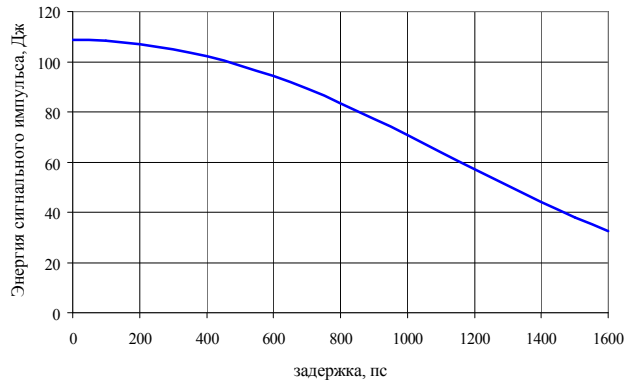


Рис. 16. Расчетная зависимость энергии на выходе из ПАУ-4 при рассинхронизации импульсов от 0 до 1000 пс, при накачке 1000 Дж и входном сигнале 2 Дж

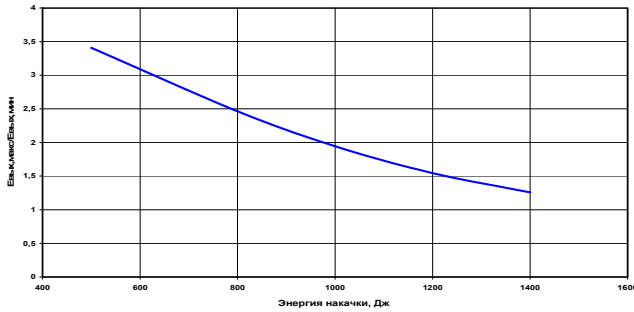


Рис. 17. Расчетная зависимость  $E_{\text{вых. макс.}}/E_{\text{вых. мин.}}(E_{\text{нак.}})$  для  $E_{\text{вх. макс.}} = 2,5 \text{ Дж}$ ,  $E_{\text{вх. мин.}} = 0,5 \text{ Дж}$  ( $E_{\text{вх. макс.}}/E_{\text{вх. мин.}} = 5$ )

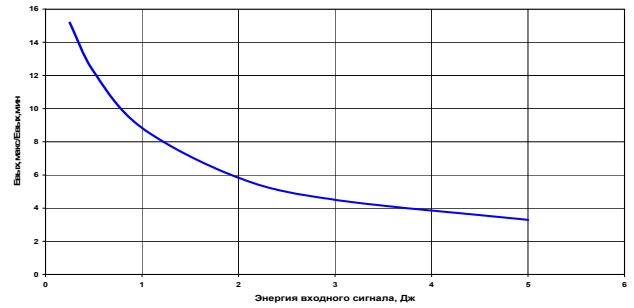


Рис. 18. Расчетная зависимость  $E_{\text{вых. макс.}}/E_{\text{вых. мин.}}(E_{\text{вх.}})$  для  $E_{\text{нак. макс.}} = 1200 \text{ Дж}$ ,  $E_{\text{нак. мин.}} = 400 \text{ Дж}$  ( $E_{\text{нак. макс.}}/E_{\text{нак. мин.}} = 3$ )

### Численное исследование параметрического усиления при изменении значений параметров системы. Способы увеличения энергетики

В экспериментах на фемтосекундном канале установки «Луч» была получена энергия усиленных импульсов  $\approx 110 \text{ Дж}$ , соответствующая ей мощность скомпрессированного импульса составила  $\approx 1 \text{ ПВт}$ . В лазерной физике появляется интерес к еще более мощным лазерным установкам. Данный раздел посвящен описанию способов увеличения мощности фемтосекундного канала установки «Луч».

Существует несколько способов увеличения мощности на фемтосекундном канале установки «Луч»: оптимизация длительности сигнального импульса при различных длинах кристалла (5 см, 5,5 см, 6 см); оптимизация временных форм сигнального импульса и импульса накачки; оптимизация энергии входного сигнала.

1) Рассмотрим, как влияет изменение длительности входного сигнального импульса гауссовой времен

ной формы на энергию параметрически усиленного импульса при различных длинах нелинейных кристаллов.

Рассчитаем энергию усиленного импульса в зависимости от длительности сигнального импульса (0,5–3 нс) при длине нелинейного кристалла 5 см, 5,5 см, 6 см и следующих параметрах: гауссова временная форма сигнального импульса, площадь сигнального пучка ( $S_{\text{сигн.}}$ )  $250 \text{ см}^2$ , длительность сигнального импульса ( $\tau_{\text{сигн.}}$ ) 0,5–3 нс, энергия сигнального импульса ( $E_{\text{вх. сигн.}}$ ,  $\lambda = 911 \text{ нм}$ ) 2 Дж, гауссова временная форма импульса накачки, площадь пучка накачки ( $S_{\text{нак.}}$ )  $350 \text{ см}^2$ , длительность импульса накачки ( $\tau_{\text{нак.}}$ ) 2,5 нс, энергия импульса накачки ( $E_{\text{нак.}}$ ,  $\lambda = 527 \text{ нм}$ ) 1,1 кДж, длина кристалла ( $L_{\text{кр.}}$ ) (5 см, 5,5 см, 6 см),  $\Delta t$  (задержка между сигнальным импульсом и импульсом накачки) 0 (точная синхронизация).

Результаты расчетов представлены на рис. 19. Видно, при длительности сигнального ( $\tau_{\text{сигн.}}$ ) импульса в диапазоне от 1,5 до 2,5 нс максимальная энергия усиленного импульса ( $\approx 300 \text{ Дж}$ ) достигается при длине нелинейного кристалла 6 см.

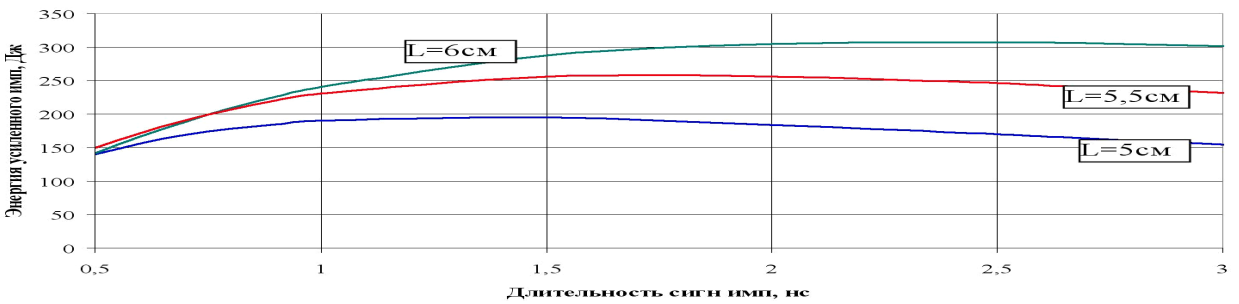


Рис. 19. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного сигнального импульса от длительности входного сигнального импульса при длине нелинейного кристалла 5 см, 5,5 см, 6 см.  $E_{\text{вх.}} = 2$  Дж,  $E_{\text{нак.}} = 1,1$  кДж,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$  нс

2) Рассмотрим, как влияет временная форма сигнального импульса и импульса накачки на энергию параметрически усиленного импульса. Были проведены расчеты для 4-х ситуаций: гауссова форма сигнального импульса и импульса накачки; супергауссова – сигнального импульса и импульса накачки; гауссова – сигнала и супергауссова – накачки; супергауссова – сигнала и гауссова – накачки.

В расчетах были заданы следующие параметры:  $S_{\text{сигн.}} = 250 \text{ см}^2$ ,  $\tau_{\text{сигн.}} = (0,5-3)$  нс;  $E_{\text{вх. сигн.}} = 2$  Дж,  $S_{\text{нак.}} = 350 \text{ см}^2$ ,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$  нс,  $E_{\text{нак.}} = 1,1$  кДж,  $L_{\text{кр.}} = 5,5$  см,  $\Delta t = 0$ .

Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от его длительности представлена на рис. 20 в четырех вариантах: гауссовый временной профиль сигнального импульса и супергауссовый – импульса накачки, супергауссовый – сигнального и супергауссовый – накачки, гауссовый – сигнального и гауссовый – накачки, супергауссовый – сигнального и гауссовый – накачки. Видно, что наибольшая энергия ( $\approx 380$  Дж) параметрически усиленного сигнального импульса достигается в случае супергауссовых временных форм сигнального импульса и импульса накачки, при длительности сигнального импульса  $\approx (2-3)$  нс.

Можно сделать вывод:

максимальная энергия параметрически усиленного импульса достигается при:

- супергауссовой временной форме импульсов накачки и сигнала:  $E_{\text{вых.}} \approx 380$  Дж при  $\tau_{\text{вх.}} \approx 2,5$  нс;
- супергауссовой временной форме импульса накачки и гауссовой временной форме импульса сигнала:  $E_{\text{вых.}} \approx 360$  Дж при  $\tau_{\text{вх.}} \approx 2$  нс.

3) Рассмотрим, как влияет изменение энергии входного сигнального импульса на энергию параметрически усиленного сигнального импульса. Для численного исследования этого метода проведем 3 серии расчетов с различными временными формами импульсов сигнала и накачки: гауссова – сигнала и гауссова – накачки; супергауссовой ( $n = 6$ ) – сигнала и супергауссовой ( $n = 6$ ) – накачки; гауссовой – сигнала и супергауссовой ( $n = 6$ ) – накачки.

В расчетах были заданы следующие параметры:  $S_{\text{сигн.}} = 250 \text{ см}^2$ ,  $\tau_{\text{сигн.}} = (0,5 \text{ нс}, 2 \text{ нс})$ ,  $E_{\text{вх. сигн.}} = (0,1-10)$  Дж,  $S_{\text{нак.}} = 350 \text{ см}^2$ ,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$  нс,  $E_{\text{нак.}} = 1,1$  кДж,  $L_{\text{кр.}} = 5,5$  см,  $\Delta t = 0$ .

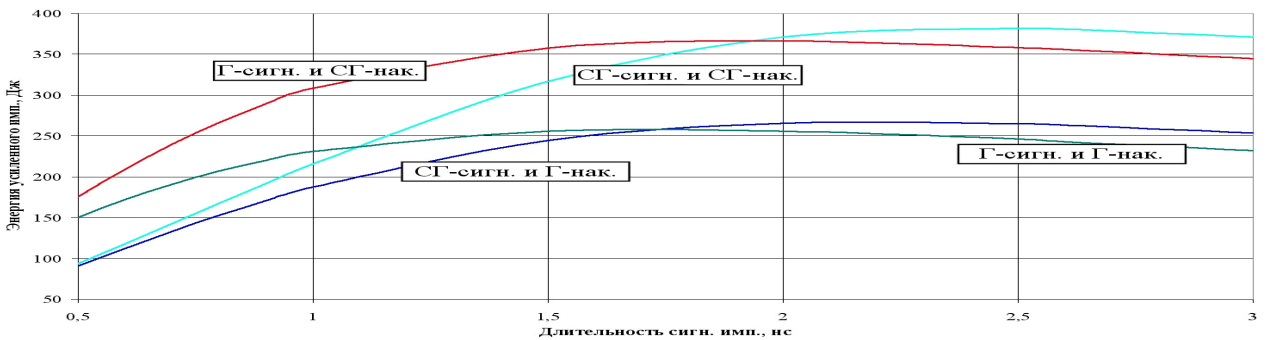


Рис. 20. Расчетная зависимость энергии усиленного сигнального импульса от длительности входного сигнального импульса при  $L_{\text{кр.}} = 5,5$  см,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$  нс,  $E_{\text{вх.}} = 2$  Дж,  $E_{\text{нак.}} = 1,1$  кДж в случае гауссовой (Г) временной формы сигнального импульса и супергауссовой (СГ)-импульса накачки, СГ-сигнала и СГ-накачки, Г-сигнала и Г-накачки



Результаты двух серий расчетов представлены на рис. 21 ( $\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$ ) и 22 ( $\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$ ). Из рис. 21 ( $\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$ ) видно, что максимальная энергия параметрически усиленного импульса составляет  $\approx 150 \text{ Дж}$  при  $E_{\text{вх.}} \approx 3 \text{ Дж}$ , в случае гауссового временного профиля сигнала.

Из рис. 22 ( $\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$ ) видно, что максимальная энергия параметрически усиленного импульса составляет  $\approx 400 \text{ Дж}$  при  $E_{\text{вх.}} \approx 4 \text{ Дж}$  в случае гауссового временного профиля сигнала и супергауссова – накачки.

Предложенный путь повышения мощности лазерного излучения фемтосекундного канала установки «Луч» заключается в оптимизации временной формы и длительности импульса накачки и chirпированного импульса и не требует повышения энергии накачки выходного параметрического усилителя.

Таким образом, можно дать следующие рекомендации на увеличение энергетика фемтосекундного канала установки «Луч».

Для получения  $\approx 350 \text{ Дж}$  в chirпированном импульсе необходимо обеспечить:

- Супергауссовый ( $n = 6$ ) временной профиль импульса накачки;

- гауссовый временной профиль сигнального импульса;
- энергию импульса накачки  $\approx 1,1 \text{ кДж}$ ;
- длительность сигнального импульса  $\approx (1,5-2,5) \text{ нс}$ ;
- длительность импульса накачки  $\approx (2-2,5) \text{ нс}$ ;
- энергию входного сигнального импульса  $\approx (1,5-9) \text{ Дж}$ ;
- длину кристалла DKDP  $\approx (5,5-6) \text{ см}$ ;
- площадь пучка накачки ( $2\omega$ )  $350 \text{ см}^2$ ;
- площадь сигнального пучка ( $\lambda = 911 \text{ нм}$ )  $250 \text{ см}^2$ ;
- точную синхронизацию сигнального импульса и импульса накачки ( $\Delta t \leq 0,4 \text{ нс}$ ).

При дифракционной эффективности решеток компрессора на уровне существующей ( $R \approx 90 \%$ ,  $R^4 \approx 66 \%$ ) в случае получения на выходе системы параметрического усиления энергии chirпированного импульса  $E_{\text{вых.}} \approx 350 \text{ Дж}$  после компрессии можно ожидать увеличения мощности лазерного излучения до  $P_{\text{вых.}} \approx 3,5-4,5 \text{ ПВт}$  при  $\tau_{\text{вых.}} \approx 50 \text{ фс}$ . Единственным принципиальным сдерживающим фактором является лучевая прочность дифракционных решеток компрессора.

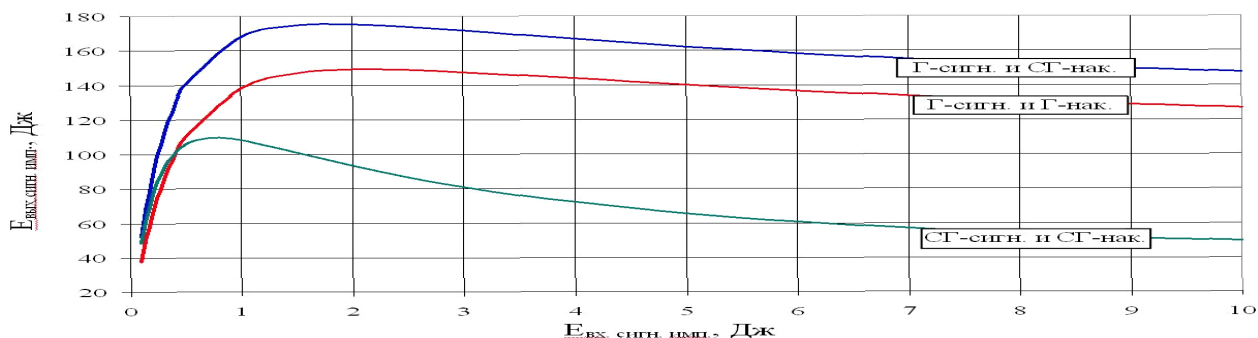


Рис. 21. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от энергии входного сигнала, при  $L_{\text{кр.}} = 5,5 \text{ см}$ ,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5 \text{ нс}$ ,  $\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$ ,  $E_{\text{вх.}} = 2 \text{ Дж}$ ,  $E_{\text{нак.}} = 1,1 \text{ кДж}$

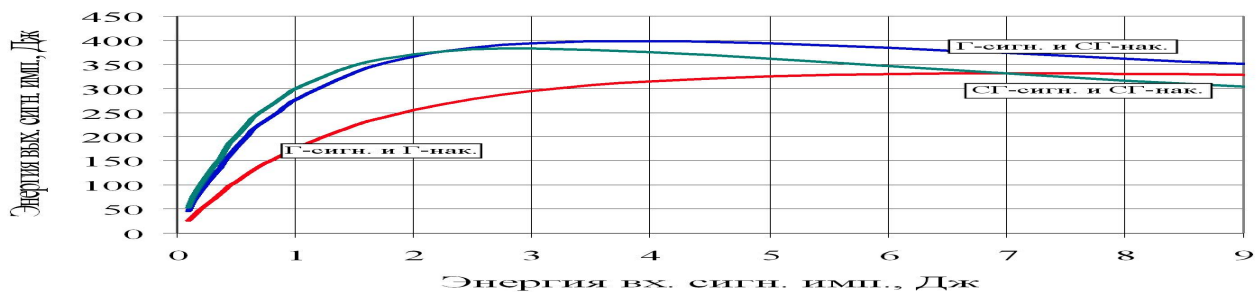


Рис. 22. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от энергии входного сигнала, при  $L_{\text{кр.}} = 5,5 \text{ см}$ ,  $\tau_{\text{нак.}} = 2,5 \text{ нс}$ ,  $\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$ ,  $E_{\text{вх.}} = 2 \text{ Дж}$ ,  $E_{\text{нак.}} = 1,1 \text{ кДж}$

Доклад «Исследование энергетики процесса параметрического усиления» посвящен экспериментальному и расчетному исследованию энергетики процесса параметрического усиления в фемтосекундном канале установки «Луч». Результаты исследований заключаются в следующем:

– Проведены эксперименты по усилению chirпированного лазерного импульса в каскадах предварительного параметрического усиления фемтосекундного канала установки «Луч». Получены зависимости энергии параметрически усиленного лазерного импульса от энергии накачки.

– С помощью разработанной компьютерной программы проведено численное описание экспериментально полученных результатов. Интерпретированы ранее проведенные эксперименты по усилению chirпированного импульса в выходном параметрическом усилителе. Получено хорошее ( $\approx 20\%$ ) согласие расчетов и экспериментов.

– На основании полученных экспериментальных и расчетных результатов выработаны рекомендации на точность временной синхронизации импульса накачки и chirпированного импульса. При длительности импульса накачки  $\approx 2,5$  нс и длительности chirпированного импульса  $\approx 0,4$  нс временная рассинхронизация между ними  $\Delta t \approx 1$  нс приводит примерно к 30 % потери в энергии.

– Численно исследовано влияние пространственной неоднородности пучков входного сигнала и накачки на неоднородность параметрически усиленного chirпированного импульса. Показано, что для уменьшения неоднородностей выходного пучка выгодно обеспечивать более высокий уровень входного сигнала и интенсивности накачки. Неоднородность пучка накачки в ближней зоне увеличивает неоднородность параметрически усиленного сигнального пучка.

– На основании расчетных данных выработаны рекомендации для получения на фемтосекундном канале установки «Луч» chirпированных лазерных импульсов с энергией  $\approx 350$  Дж. Для этого необходимо обеспечить супергауссовый ( $n \approx 6$ ) временной профиль импульса накачки с энергией  $E_{\text{нак.}} \approx 1,1$  кДж и длительностью  $\tau_{\text{нак.}} \approx (2-2,5)$  нс и гауссовый временной профиль сигнального импульса с энергией  $E_{\text{сигн.}} \approx 2$  Дж и длительностью  $\tau_{\text{сигн.}} \approx (1,5-2,5)$  нс. При этом длина кристалла DKDP выходного параметрического усилителя должна составлять  $\approx (5,5-6)$  см.

1. Ахманов С. А., Выслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.

2. Penington M. D., Perry M. D., Stuart B. C., Boyd R. D. et. al. Petawatt laser system // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3047. P. 490–500.

3. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 31, № 2, 2001. С. 95–119.

4. Пискаркас А., Стабинис А., Янкаускас А. Фазовые явления в параметрических усилителях и генераторах сверхкоротких импульсов света // УФН. 150. Вып. 1. 1986. С. 127–143.

5. Ross I. N., Matousek P., Towrie M., Collier A. J. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers // Optics Communications 144. December 1, 1997. P. 125–133.

6. Freidman G. I., Andreev N. F., Bepalov V. I., Bredikhin V. I. et. al. Super Broadband Parametric Amplification for Multi-Petawatt Optical Pulse Generation. International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Physics», Institute of Applied Physics, RAS. – Nizhny Novgorod, 2003. Proceedings. P. 203–204.

7. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И., Кириллов Г. А. и др. Канал мощной установки «ЛУЧ» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

8. Lozhkarev V. V., Freidman G. I., Ginzburg V. N., Katin E. V. et. al. 200 TW 45fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification // Optics Express. 2006. Vol. 14, N 1. P. 446–454.

9. Гаранин С. Г., Гинзбург В. Н., Катин Е. В. и др. Получение мощных сверхкоротких световых импульсов на основе широкополосного параметрического усиления chirпированных импульсов в кристаллах DKDP. Экспериментальные результаты и перспективы. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 210–223.

10. Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др. Новая схема петаваттного лазера на основе невырожденного параметрического усиления chirпированных импульсов в кристаллах DKDP // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 4. С. 178–182.

11. Bepalov V. I., Bredikhin V. I., Freidman G. I. et al. «Multi-cascade non-degenerated optical parametric chirped-pulse amplifier based on KD\*P crystals» in Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-2004, May 16–21, San Francisco, California, 2004, C. CFB4.

# ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОМОДУЛИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЕГЕТАТИВНУЮ НЕРВНУЮ СИСТЕМУ КРЫС ПРИ ГИПОТЕРМИИ

М. Н. Мишагина, Е. П. Лобкаева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В последнее время большой интерес вызывает применение магнитного поля (МП) в лечебных целях. К настоящему времени накоплен огромный фактический материал, свидетельствующий о том, что МП определенных параметров оказывает положительный эффект при комплексной терапии больных с различными видами заболеваний: гипертонической болезни, атеросклерозом, аллергическими и кожными заболеваниями, сердечно-сосудистой и опорно-двигательной системы и т. д. [1, 2]. Однако данные по влиянию МП на эффекты гипотермии и восстановлению после холодовой травмы крайне ограничены.

Холодовая травма является тяжелым поражением и на сегодняшний день считается одной из важных причин, приводящей к стойкой инвалидизации пострадавших.

Изучение патогенеза, эффективных методов лечения и профилактики холодовой травмы является чрезвычайно актуальной проблемой.

В настоящее время еще не выработано единой концепции по нормализации функций жизненно важных систем организма после переохлаждения. Нет обоснованных правил по проведению мероприятий, направленных на повышение температуры тела до нормального уровня; восстановлению кровообращения в пораженных холодом областях; предупреждения и лечения местных и общих инфекционных и сосудистых осложнений.

Целью данной работы являлось изучение влияния сложно модулированного низкоинтенсивного МП на функционирование вегетативной нервной системы (ВНС) крыс при состоянии гипотермии организма.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись нелинейные белые крысы обоего пола массой 150–250 г в количестве 46 голов, находившиеся в условиях стандартного кормления и содержания.

У животных, разделенных на экспериментальные группы (см. табл.), регистрировали электрокардиограмму (ЭКГ) с помощью установки, состоящей из кардиографа фирмы RFT (Германия), соединенного с аналогово-цифровым преобразователем через последовательный порт (COM) с персональным компьютером PC Pentium 3. Сигнал ЭКГ обрабатывали программой LABView. В данной программе осуществляли логическую фильтрацию кардиосигнала (удаляли иска-

жения, связанные с двигательной активностью животного) и преобразование ЭКГ в кардиоинтервалограмму (КИГ). Дальнейший расчет показателей вегетативного статуса по Р. М. Баевскому [3] выполняли с применением авторской программы Л. М. Кустова Puls [4].

Таблица

Распределение крыс на экспериментальные группы по характеру воздействия

№ группы	Характер воздействия	Кол-во крыс, шт.
1	Частичная иммобилизация и местная анестезия	10
2	Внутрибрюшинное введение аминазина в дозе 40 мг/кг для моделирования состояния гипотермии организма крыс (32 °С)	12
3	Воздействие сложно модулированным МП напряженностью 3,3 мТл	12
4	Воздействие аминазином в дозе 40 мг/кг и сложно модулированным МП с выбранной интенсивностью 3,3 мТл	12
Всего:		46

Для регистрации кардиограммы крысу помещали в специальную камеру, представляющую собой контейнер из органического стекла. На дно контейнера была установлена металлизированная контактная пластина. Кардиограмму регистрировали с помощью электродов в виде миниатюрной английской булавки, которые закреплялись на крысе подкожно между лопаток и слева от основания хвоста (у основания левого бедра). В местах установки электродов у животных проводили местное обезболивание 0,5 мл 1 %-ным раствором лидокаина. Такое крепление электродов позволяло наблюдать на ЭКГ наибольшую величину зубца R. Электроды соединялись с электрокардиографом через латунный зажим типа «крокодил» и проводники; индифферентный вход кардиографа соединялся с токопроводящей пластиной дна камеры.

Зарегистрированные показатели вегетативного статуса (ВС) животных первой группы являлись контрольными.

Животным второй и четвертой групп перед исследованием был внутрибрюшинно введен аминазин в дозе 40 мг/кг.

Аминазин – стандартный, нейролептический препарат, оказывающий влияние, как на центральную, так и на периферическую нервную систему. Одним из важных эффектов аминазина является гипотермическое воздействие, особенно при искусственном охлаждении организма, поэтому часто препарат используют в исследованиях для моделирования состояния гипотермии [5, 6].

После уменьшения подвижности на крысах с введенным аминазином ректально размещали датчик электронного термометра, модифицированного для регистрации температуры тела у животных. Абсолютная погрешность преобразования составила менее 0,1 °С.

Температуру тела у этих крыс поддерживали при помощи термоодеяла, адаптированного для термостатирования мелких лабораторных животных.

Воздействие МП на животных третьей и четвертой групп осуществляли на установке, состоящей из индуктора, соединенного с генератором переменного МП, модулированного сигналом, близким к фликер-шуму. Амплитудно-частотный спектр МП представлен на рис. 1. Индуктор представлял собой плоскую катушку, создающую в рабочей зоне МП напряженность 3,3 мТл. Камеру с крысой помещали внутрь индуктора таким образом, что он находился в области головы и груди животного (рис. 2).

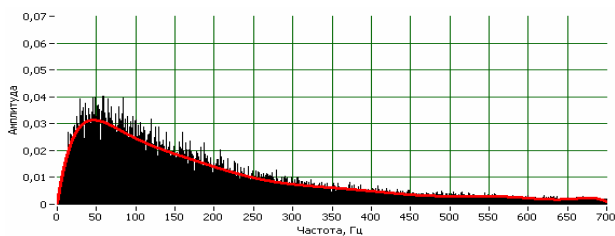


Рис. 1. Амплитудно-частотный спектр МП

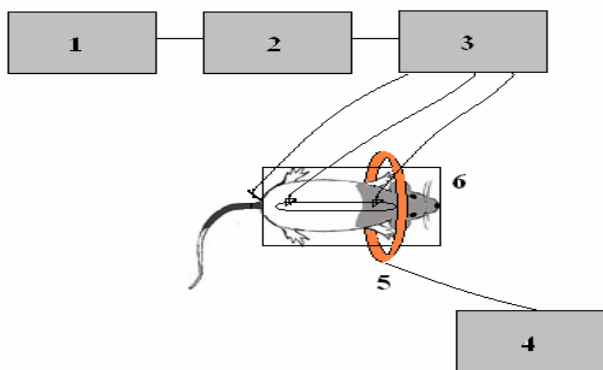


Рис. 2. Блок-схема установки для регистрации ЭКГ и воздействия переменным МП:

- 1 – программно-аппаратный комплекс с LABView;
- 2 – аналогово-цифровой преобразователь;
- 3 – кардиограф; 4 – генератор переменного МП;
- 5 – индуктор; 6 – специальный контейнер с прозрачными стенками, в котором находится животное

Регистрацию ЭКГ проводили в течение часа после 15-ти минутной адаптации. Первые показания ЭКГ принимали за исходный вегетативный статус (ИВС). Также показатели вегетативного статуса оценивали на 20, 30, 50 и 60 минутах эксперимента.

Расчет времени R-R интервалов и показателей ВС проводили на основании ЭКГ, зарегистрированных у всех животных.

По данным вариационной пульсометрии рассчитывали основные числовые значения: моду ( $M_0$ ), амплитуду моды ( $AM_0$ ), вариационный размах ( $Dx$ ). Индекс напряжения (ИН) регуляторных систем рассчитывали по формуле

$$ИН = AM_0 / 2 * M_0 * Dx,$$

где ИН – суммарный показатель, наиболее полно отражающий степень напряжения регуляторных механизмов организма, уровень централизации управления кровообращением. Чем больше значение ИН, тем больше напряжены регуляторные системы [3].

Результаты исследований обрабатывали статистически с помощью стандартных методов. В работе определяли средние значения ( $M$ ) измеряемых величин и стандартные отклонения среднего ( $m$ ), а также достоверности разницы между средними арифметическими для двух выборочных совокупностей по  $t$  – критерию Стьюдента.

## Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований реакции животных на частичную иммобилизацию в контейнере для регистрации ЭКГ не выявлено показательных изменений показателей variability сердечного ритма (BCP) крыс в течение 60 мин наблюдения.

Среднее значение ИН регуляторных систем при ИВС составило  $5832 \pm 931$  у. е., через 60 мин оно увеличилось в 1,1 раза ( $p > 0,05$ ) (рис. 3).

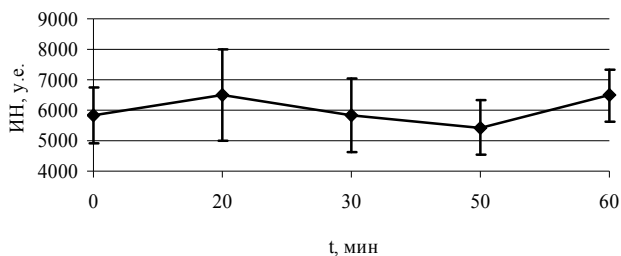


Рис. 3. Показатели ВСР крыс при размещении животных в камере для частичной иммобилизации

Животные находились в спокойном состоянии, дремали, периодически проявляли умеренную активность, просыпались, обнюхивались, шевелили лапами и головой, потягивались, проявляли адекватность в поведенческих реакциях [7].

Представленные результаты свидетельствуют об адекватности выбранного метода фиксации животного, не вызывающего стрессорных реакций организма. Однако при длительной иммобилизации животных наблюдали тенденцию к увеличению напряжения регуляторных систем.

Действие аминазина в дозе 40 мг/кг веса животного при температуре окружающей среды (лаборатории) 20–23 °С приводило к снижению температуры тела животного до 32 °С через 20–30 мин. Определение ВС крыс при состоянии гипотермии организма животного (32 °С тела) показало достоверное увеличение ИН регуляторных систем в 3,25 раза ( $p < 0,05$ ). Среднее значение ИН ИВС составило 2513 ± 522 у. е. (рис. 4).

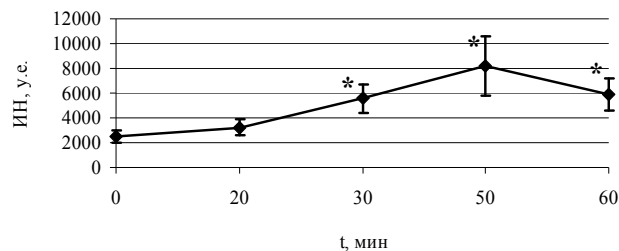


Рис. 4. Показатели ВСП крыс при аминазиновой гипотермии (доза аминазина 40 мг/кг)  $t - 32$  °С:

\* – различия достоверны по сравнению с ИВС ( $p < 0,05$ )

Аминазин устраняет или ослабляет влияние ретикулярной формации на кору больших полушарий, блокируя импульсы от сенсорных путей, поступающие в нее коллатерально [5].

Механизм гипотермического эффекта препарата обусловлен понижением двигательной активности, расширением периферических сосудов, понижением клеточного обмена, нарушением процессов центральной терморегуляции. Гипотермия, вызванная аминазином, дополнительно угнетает центральную нервную систему (ЦНС), уменьшая скорость прохождения нервных импульсов, что вызывает снижение внешней иннервации сердца [6].

Малые значения ВСП, возрастание влияния симпатического отдела ВНС приводит к увеличению ИН регуляторных систем. Таким образом, показатели ВСП в большей степени отражают состояние метасимпатической системы сердца. Такое состояние сердца подобно изолированию его от организма [8].

Таким образом, в ходе эксперимента показано разобщение регуляторных процессов в организме в целом, проявляющееся в снижении значений гуморальной регуляции и возросшей активности метасимпатической нервной системы сердца, которая ранее была заторможена более высокими отделами ВНС.

Действие сложномодулированного МП приводило к достоверному снижению ИН регуляторных систем в 3,5 раза ( $p < 0,05$ ) после 60 минут воздействия при ИВС  $7784 \pm 1956$  у. е. (рис. 5).

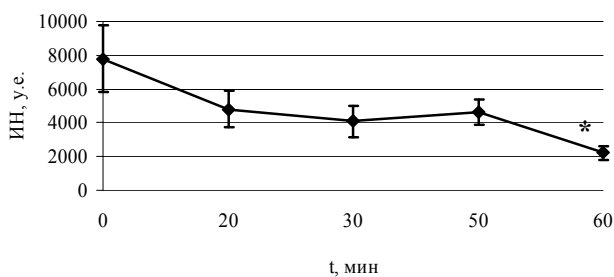


Рис. 5. Показатели ВСП крыс при воздействии сложномодулированного МП: \* – различия достоверны по сравнению с ИВС ( $p < 0,05$ )

По мнению ряда авторов, переменное МП, модулированное сигналом, близким к фликкер-шуму, вызывает наведение токов в токопроводящих жидкостях организма. Широкий спектр частот и амплитуд раздражителя выбранного типа МП вызывает возбуждение многочисленных структур организма, которые в качестве способа передачи информации используют электрический ток. Такими структурами в организме являются нейроны, синапсы, периферические и центральные ганглии, нервные цепочки и нервные центры, мышечные волокна и элементы сопряжения сокращений [9].

Таким образом, МП является источником дополнительного адекватного раздражителя на уровне клеточных органелл, клеток, тканей, органов и нейрогуморальной системы организма.

Так, возбуждение на уровне синапсов приводит, за счет их функциональной пластичности, к облегчению проводимости, повышению эффективности синтеза медиаторов и их накоплению.

МП вызывает снижение содержания ионов  $Na^+$  при одновременном повышении концентрации ионов  $K^+$ , что является свидетельством изменения проницаемости клеточных мембран. МП низкой интенсивности также вызывают изменение концентрации свободного  $Ca^{2+}$  во вне- и внутриклеточных средах животной ткани. Повышение концентрации  $Ca^{2+}$  внутри клетки из-за действия МП приводит к возникновению реакций нервных клеток, что может повлечь за собой изменения в перераспределении возбуждений-торможений нервной системы. Такие ионные процессы, происходящие в клетке и на уровне электрических свойств мембраны, снижают уровень возбуждения систем [10].

Также снижение проявляется и на уровне метаболизма. Снижение напряжения регуляторных систем создает условия для реализации трофотропных обменных процессов.

Трофотропный метаболизм – это использование в качестве энергетической субстанции пластических веществ (гликогена, жира), модифицирует синтез веществ на генетическом уровне и т. д. [11]. Такая реактивность организма приводит к снижению интенсивности адаптационных механизмов регуляции [12].

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что действие сложномодулированного МП при выбранной интенсивности (3,3 мТл) в течение 60 мин вызвало снижение напряжения регуляторных систем, активизацию трофотропных реакций, что приводило к накоплению энергетических ресурсов организма (свободные жирные кислоты, глюкоза, кислород, АТФ).

Дальнейшие исследования действия сложномодулированного МП на организм крыс при гипотермии показали отсутствие достоверных изменений показателей ВСР крыс в течение 60 минут наблюдения. Среднее значение ИН ИВС составило  $3041 \pm 666$  у. е., через 60 мин оно увеличилось в 1,5 раза ( $p > 0,05$ ) (рис. 6).

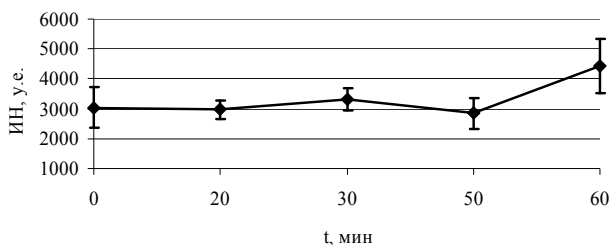


Рис. 6. Показатели ВСР крыс при гипотермии  $t = 32^\circ\text{C}$  и действии МП

ИН регуляторных систем не имел резких отклонений от ИВС, что указывает на стабильность регуляторных систем организма. МП вызвало повышение активности гуморальной регуляции организма (Мо) и ее стабилизацию. Стабилизация гуморальных эффектов в организме привела к стабилизации симпатического звена (Амо) ВНС и парасимпатической регуляции организма (Дх). Такие изменения обусловлены тем, что МП вызвало достоверное увеличение парасимпатических влияний ВНС и, соответственно, вызвало активацию энергетических ресурсов в результате трофотропных реакций, что обеспечило, при гипотермии, поступление из депо легко доступных энергетических веществ (глюкоза, АТФ, кислород, жирные кислоты). Этим и определен наступивший баланс симпатических и парасимпатических влияний и гуморальной регуляции [13].

Таким образом, исследования показали, что МП, модулированное сигналом близким к фликер-шуму, способно при модельной гипотермии стабилизировать реакции ВНС и устранить дальнейшее развитие повреждающего фактора.

## Выводы

1. Гипотермия, вызванная аминазином, привела к снижению значений показателей парасимпатической и гуморальной регуляций, увеличению симпатических

влияний. Данные показатели ВСР в большей степени отражают состояние метасимпатической системы сердца, подобное изолированию его от организма.

2. Воздействие переменным МП, модулированным сигналом, близким к фликер-шуму, при выбранной интенсивности облегчает адаптацию к вредным воздействиям.

3. Действие сложномодулированного МП на организм крыс в состоянии гипотермии привело к стабилизации регуляторных систем организма и устранению дальнейшего развития повреждающего фактора.

## Литература

1. Демецкий А. М. Современные представления о механизмах лечебного действия магнитных полей // *Магнитобиология*. 1991, № 1. С. 6–11.
2. Вавиловская Л. Ф. Магнитотерапия больных цереброваскулярной патологией, обусловленной атеросклерозом: Дисс. Канд. Мед. наук. Харьков, 1987.
3. Баевский Р. М. Математический анализ изменений сердечного ритма. М.: Наука, 1984.
4. Определение глубины ремиссии при бронхиальной астме у детей методом кардиоинтервалографии: Методическое пособие / Л. М. Кустов, В. Н. Крылов, Л. В. Ошевенский и др. Н. Новгород: изд. салон ИП Гладкова О. В., 2005.
5. Машковский М. Д. Лекарственные средства // *Медицина*. 1987. Т. 1, № 5. С. 41–44.
6. Лекарственные средства в клинической кардиологии: Справочник / под ред. А. И. Грицюка. К.: «Здоров'я», 1986.
7. Буреш Я., Бурешова О., Хьюстон Д. П. Методики, основные эксперименты по изучению мозга и поведения / Пер. с англ. М., 1991.
8. Дворников А. В. Вариабельность сердечного ритма при различных функциональных состояниях вегетативной регуляции у крыс. Афтореф. дис. канд. биол. наук. Н. Новгород, 2002.
9. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Фликкершум и регулярные составляющие в вариациях электротеллурического поля. М., 1996.
10. Ноздрачев А. Д. Физиология вегетативной нервной системы. Л., 1983.
11. Ткаченко Б. И. Центральная регуляция органической гемодинамики. СПб, 1994.
12. Retchen G. P. The biological effects of magnetic fields of man // *Amer. Ind. Hyg. Assoc. I*. 1978. Vol. 39. P. 1–11.
13. Холодов Ю. А. Лебедева Н. Н. Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля. М.: Наука, 1992.

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ОСЦИЛЛОГРАФОВ LECROY WAVEPRO 715ZI

К. М. Музюкин, Е. Н. Крылевский, С. А. Лазарев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для измерения параметров гамма и нейтронных полей и дозиметрического сопровождения радиационных исследований, а также для контроля работы установок облучательного комплекса (ОК) ПУЛЬСАР[1], создана и применяется диагностическая система (ДС). ДС состоит из двух аппаратурных комплексов СКПФ-204 и СКПФ-209, разработанных в НИИИТ (г. Москва), и включает в себя ряд методик (ИГД<sup>1</sup>, ИКС<sup>2</sup>, МВП<sup>3</sup>, МЛХ<sup>4</sup>) измерения параметров полей тормозного и нейтронного излучений [2, 3]. В состав каждого из комплексов входит набор регистрирующей и вспомогательной аппаратуры, позволяющей проводить настройку, контроль и управление регистраторами в процессе подготовки и проведения экспериментов [2]. Комплексы СКПФ-204 и СКПФ-209 близки по составу и функциональному назначению и различаются тем, что в СКПФ-209 используются цифровые регистраторы сигналов, имеющие блоки вывода записанной информации в ЭВМ. В СКПФ-204 применяются регистраторы с традиционным, फिल्मовым, съемом информации.

В 2009 г. комплекс СКПФ-209 был переоборудован. В настоящее время измерительный комплекс состоит из шестнадцати осциллографов фирмы LeCroy. Каждый осциллограф имеет 4 измерительных канала и может зарегистрировать до 10 млн. отсчетов сигнала (~ 300 Мб) по каждому каналу. Для работы с экспериментальными данными был разработан программный комплекс (ПК), состоящий из совокупности программ, каждая из которых выполняет определенный набор задач (подготовка карты эксперимента, мониторинг осциллографов, сохранение осциллограмм, обработка осциллограмм, создание отчета), логически связанных между собой. Ядром ПК является база данных (БД), в которой хранятся результаты обработки осциллограмм и исходная информация для экспериментов. БД размещена на выделенном сервере и обращение программ к ней производится по локальной вычислительной сети (ЛВС) стандарта Ethernet с помощью запросов SQL. На рис. 1 показано как осуществляется обмен информацией между программами с использованием БД. Осциллограммы, в виду своего объема (до 300 Мб) хранятся в виде файлов в каталогах со строгой иерархией.

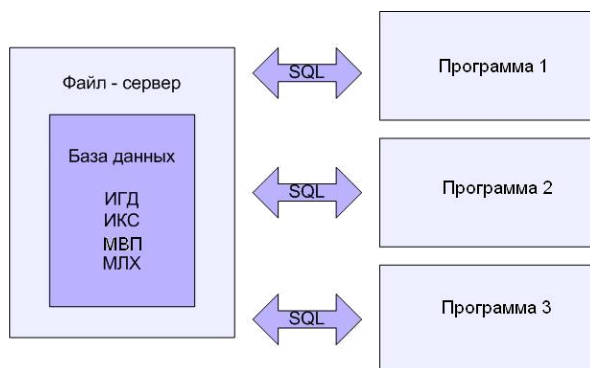


Рис. 1. Логическая структура программного комплекса

Упрощенная схема БД приведена на рис. 2. На данной схеме показаны основные таблицы, в которых хранится информация по всем типам измерения. Названия таблиц выделены голубым фоном, а ниже расположены названия основных полей таблиц. Линиями показаны связи между таблицами. Таблица «Установка» содержит перечисление всех установок ОК ПУЛЬСАР. Таблица «Импульс» содержит информацию обо всех импульсах проводимых на ОК ПУЛЬСАР. В таблицах «Детектор», «Регистратор», «СБПК» соответственно перечислены все детекторы и их параметры, регистраторы, блоки питания которые используются в измерениях. В таблицу «Измерительный канал» заносятся элементы схем регистрации (с помощью подстановки из таблиц «Детектор», «Регистратор», «СБПК» и др.), а также параметры зарегистрированных осциллограмм. В таблице «Измерительный канал» присутствует поле «Методика», которое указывает, в какой методике данная измерительная схема присутствует. Далее информация из таблицы «Измерительный канал» распределяется (с помощью SQL запроса) в таблицы, соответствующие методам измерений, в которых использовалась данная схема регистрации, и вычисляются выходные параметры.

Применение БД позволило решить следующие задачи: организовать доступ к данным с любого компьютера ОК ПУЛЬСАР для пользователей, обладающих соответствующими правами доступа; организовать ввод данных, обеспечить их целостность и полноту, стандартизировать и структурировать данные.

Этапы работы программного комплекса представлены ниже:

1. создание карты эксперимента (используются данные из БД);
2. мониторинг осциллографов во время подготовки эксперимента (используется программа LeCroy Monitor);

<sup>1</sup> ИГД – метод импульсной гамма дозиметрии [3].  
<sup>2</sup> ИКС – метод индивидуального контроля с помощью стекло [3].  
<sup>3</sup> МВП – метод времени пролета [3].  
<sup>4</sup> МЛХ – метод линейных характеристик [3].



3. сохранение данных после эксперимента (программа LeCroy Data Saver);

4. обработка данных и занесение в БД полученных результатов;

5. создание отчета по эксперименту.

Рассмотрим более детально каждый из этапов.

Карта эксперимента создается с использованием данных из БД, таких как номер кабеля, тип детектора, регистратор, СБПК, методика, координаты детекторов в облучательном зале и т. д. (рис. 3).

Карта применяется для подготовки эксперимента и проведения расчетов по результатам эксперимента. После составления карты устанавливаются детекторы, и настраивается аппаратура.

В процессе эксперимента регистрирующая аппаратура постоянно находится под наблюдением оператора, для чего разработана программа LeCroy Manager в режиме монитора (рис. 4).

В основном окне LeCroy Manager – Monitor расположены две таблицы – слева производится выбор осциллографов, участвующих в эксперименте, и после нажатия кнопки «Add scopes» они добавляются в таблицу «Parameters», справа отображаются параметры выбранных осциллографов. Предусмотрена возможность выбора и установки параметров осциллографа и изменения периодичности их обновления.

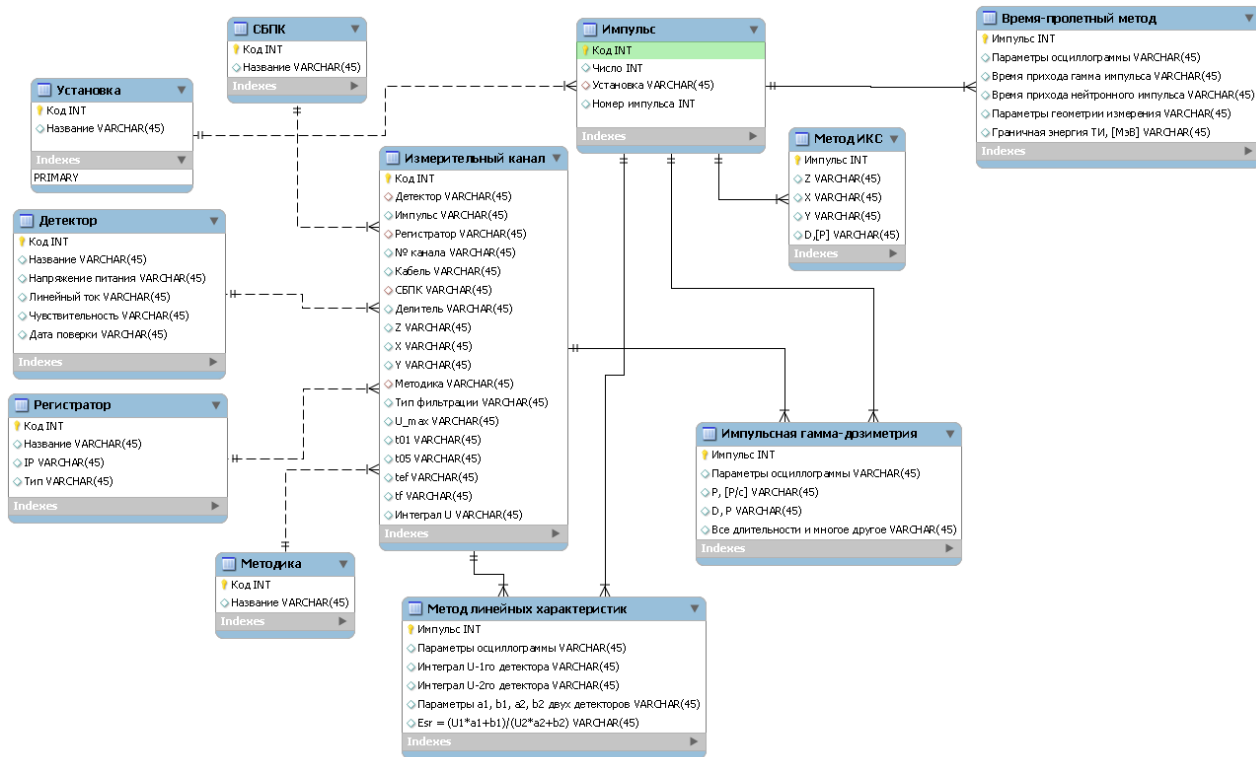


Рис. 2. Принципиальная схема БД

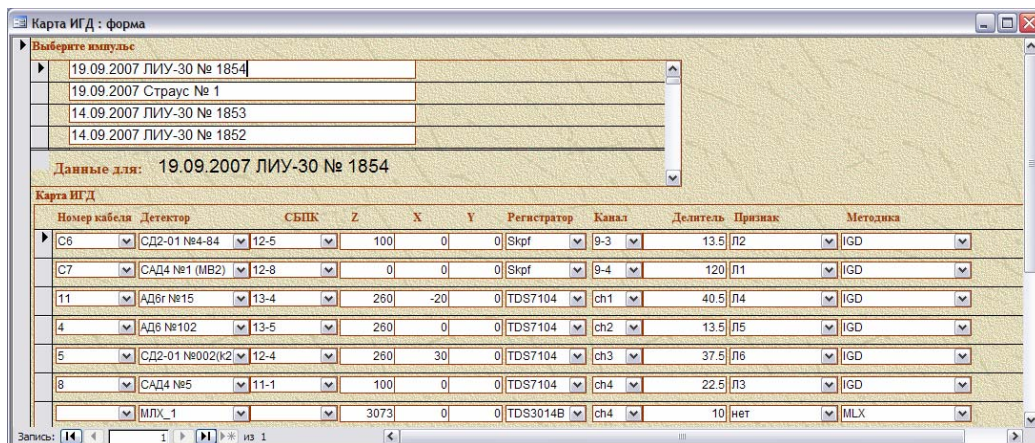


Рис. 3. Окно подготовки карты к эксперименту по одной из методик

Перед экспериментом важно, что бы все осциллографы поддерживали заданное пусковое состояние, поэтому в программе реализована функция установки режима запуска осциллографов. Данная функция доступна в меню «Scopes states».

После регистрации сигнала, данные необходимо быстро сохранить. Для централизованного сохране-

ния полученных данных разработана программа Le-Croy Manager – режим сохранения данных (рис. 5). Программа запрашивает данные с каждого осциллографа и помещает их в выбранный оператором каталог. Передача данных от осциллографа к компьютеру оператора осуществляется по локальной вычислительной сети (ЛВС) стандарта Ethernet. Ниже приводится пример работы программы.

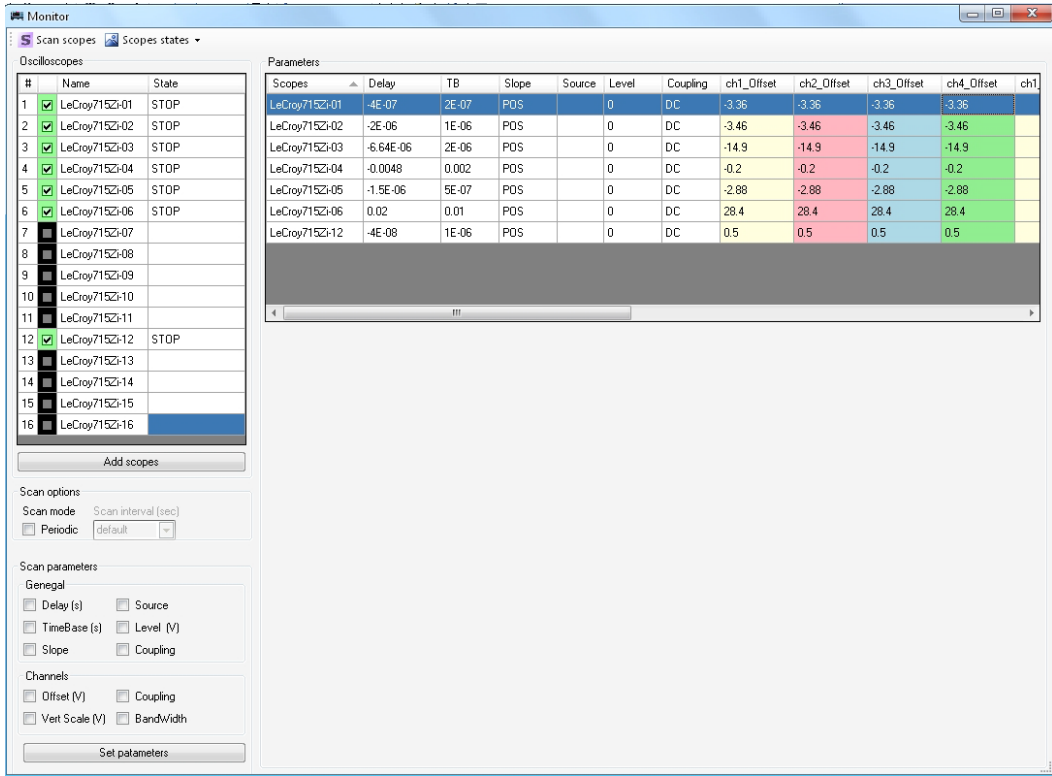


Рис. 4. Режим монитора

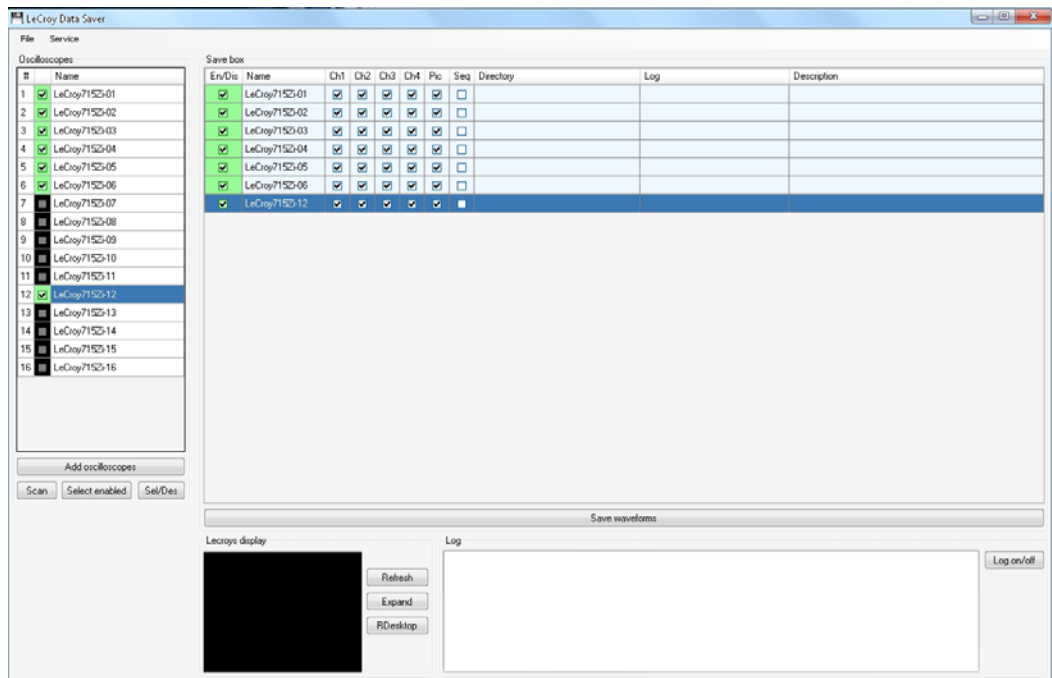


Рис. 5. Режим сохранения данных

После запуска LeCroy Manager отображается окно приглашения, в котором выбирается режим работы. Рассмотрим режим сохранения данных.

Последовательность действий при работе в режиме сохранения данных следующая:

1. Просканировать парк осциллографов, нажав кнопку «Scan»;

2. Выбрать осциллографы, участвующие в эксперименте из таблицы «Oscilloscopes» добавить их на основную таблицу – «Save box»;

3. Выбрать место для сохранения данных (рис. 6), возможные варианты – база данных<sup>5</sup> осциллограмм (data base) или локальная директория (local directory). Для ускорения заполнения полей «Directory» предусмотрена функция автозаполнения. При использовании этой функции автоматически генерируется директории для данных с каждого осциллографа, что продемонстрировано на рис. 7;

4. После выбора директории для сохранения необходимо выбрать каналы осциллографов, с которых будут считываться данные, так же есть возможность сохранить изображение с экрана осциллографа;

5. Для того чтобы убедиться в правильности выбранных осциллографов, в программу заложена возможность просмотра экрана осциллографа;

<sup>5</sup> Под базой данных имеется ввиду структурированная иерархия каталогов на файловой системе, предназначенная для хранения осциллограмм.

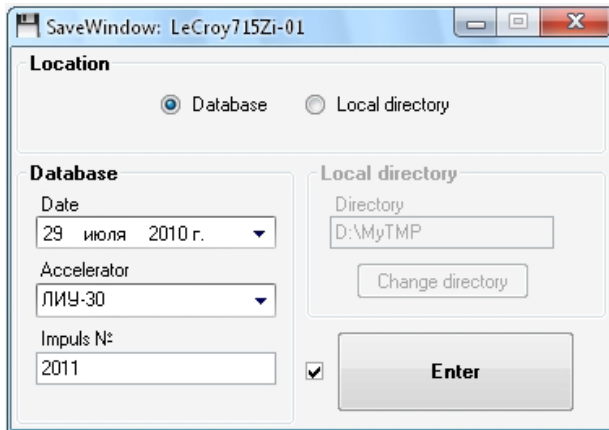


Рис. 6. Окно выбора пути сохранения

6. После завершения подготовительных работ необходимо нажать «Save waveform», начнется сохранение осциллограмм, по окончании процесса в колонке «Log» появится запись об успешном завершении.

В результате с осциллографов считываются и размещаются в требуемых директориях данные по каждому каналу. Для защиты от потери данных они дублируются в бинарном формате на жестком диске каждого осциллографа. События, происходящие при работе программы, заносятся в окно «Log» (рис. 7) (возможно отключение регистрации событий программы – кнопка «Log on/off») и дублируются в файл «Log.txt».

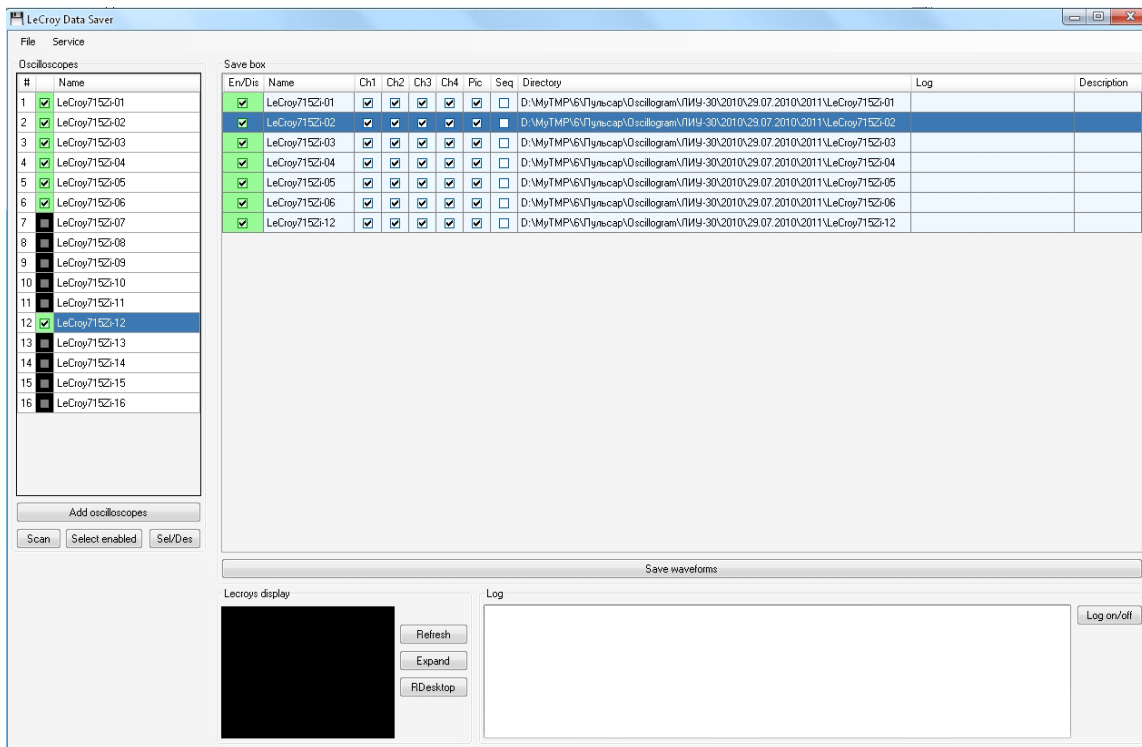


Рис. 7. Сохранение данных

После сохранения экспериментальных данных следует этап обработки. Рассмотрим его на примере обработки данных методики импульсной гамма дозиметрии.

По полученным осциллограммам требуется рассчитывать следующие параметры: интеграл, максимум осциллограммы, длительность на полувысоте, фронт импульса, эффективная длительность, время прихода характерных точек, что бывает необходимо для временной привязки осциллограмм между собой. Для проведения данных расчетов была разработана специализированная программа, которая позволяет работать с осциллограммами, полученными на осциллографах фирм LeCroy и Tektronix. Интерфейс программы приведен на рис. 8.

При запуске программа подключается к БД и находит все необработанные осциллограммы, количество необработанных осциллограмм и номер текущей указаны в параметре «Запись». При этом на экран выводится текущая необработанная осциллограмма. Оператор с помощью маркеров задает интервал, по которому необходимо провести обработку (место положения импульса). При нажатии кнопки «Сохранить» программа рассчитывает перечисленные выше параметры и заносит их в БД (таблица «Измеритель

ный канал»). Для перехода к следующей необработанной осциллограмме используется кнопка «>».

В программе большое внимание уделяется алгоритмам фильтрации высокочастотных шумов, что повышает точность измерения временных характеристик, и алгоритмам коррекции осциллограмм относительно нулевого уровня, что очень важно при расчете интегральных характеристик.

Для каждого проведенного эксперимента автоматически создается отчет на основе обработанных данных (рис. 9).

Отчет можно распечатать на принтере, либо представить в электронном виде.

Разработанные программы успешно применяются на измерительном комплексе СКПФ-209. С использованием программного комплекса время подготовки к эксперименту и обработки осциллограмм многократно сократилось. Несмотря на то, что количество каналов увеличилось (до 64), общее время обработки данных (от 4 до 64 осциллограмм) составляет не более 10 мин. До применения программного комплекса обработка одной осциллограммы занимала более 10 мин. Так же была проведена стандартизация данных, что позволило быстро получать данные по любому проведенному эксперименту.

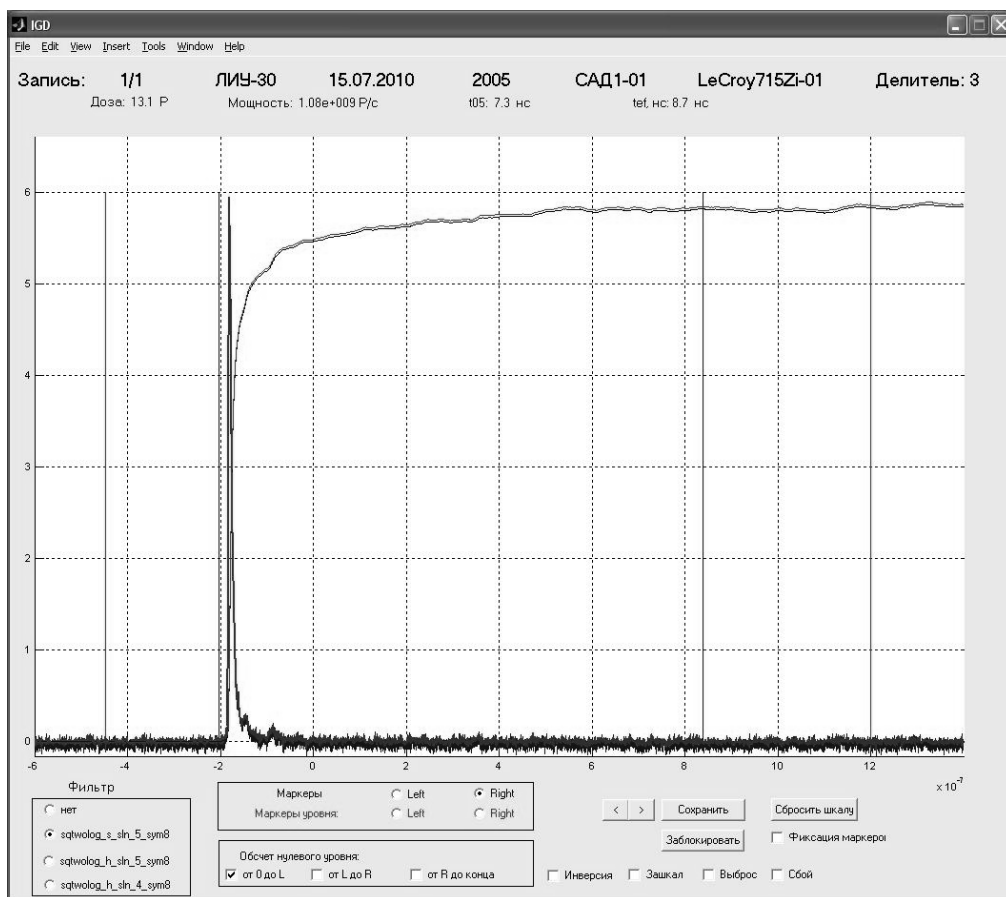


Рис. 8. Обработка данных

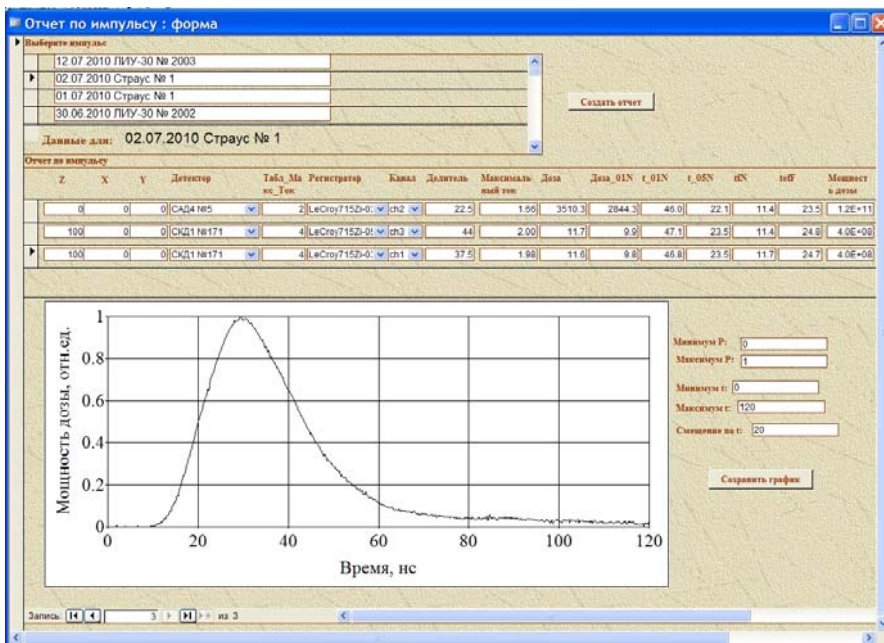


Рис. 9. Отчет по эксперименту

## Литература

1. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В., Гордеев В. С. и др. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. Вып. 1. С. 356–362.

2. Брюков Б. В., Герасимов А. И., Гончаров А. С., Лазарев С. А. и др. Дозиметрическое сопровождение радиационных исследований на мощном линейном ус-

корителе ЛИУ-30 // Радиационная стойкость электронных систем, СТОЙКОСТЬ-2001. М.: СПЭЛС, 2001. Вып. 4. С. 241–243.

3. Герасимов А. И., Гордеев В. С., Горноста́й – Польский С. А., Гришин А. В. и др. Измерения характеристик высокоинтенсивных полей излучений при проведении радиационных исследований на моделирующих установках и комплексах РФЯЦ-ВНИИЭФ // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии: Сборник докладов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 73–80.

# ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГОЛЬМИЕВОГО (Ho:YAG) ЛАЗЕРА

А. В. Мухин, В. И. Лазаренко, С. Н. Синьков, Ю. Н. Фролов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Создание эффективных лазерных систем, генерирующих излучение в безопасном для глаз диапазоне длин волн (1900–2100) нм, является одной из важных задач современной лазерной физики. Это связано с широкими возможностями практического использования данных лазеров в медицине, лидарном зондировании атмосферы, для накачки параметрических генераторов света среднего ИК-диапазона [1–4]. К важнейшим представителям данного класса лазерных систем относятся твердотельные лазеры с диодно-лазерной накачкой на основе кристаллов содержащих ионы гольмия  $\text{Ho}^{3+}$ .

В ряде задач, связанных с практическим применением таких лазеров, необходимо обеспечить эффективную амплитудную модуляцию выходного лазерного излучения с высоким контрастом. Чаще всего для этого применяются электрооптические и акустооптические модуляторы. Электрооптические модуляторы обеспечивают высокую эффективность модуляции. Однако они не позволяют получать высокий контраст излучения. Акустооптические модуляторы обладают меньшей эффективностью, но благодаря пространственному разделению лучей обеспечивают высокий контраст [5].

В данной работе представлены результаты исследования амплитудной модуляции излучения Ho:YAG с помощью акустооптического фильтра на основе кристалла диоксида теллура ( $\text{TeO}_2$ ).

Диоксид теллура (парателлуриит) – одноосный положительный кристалл. Он широко применяется в самых различных устройствах – дефлекторах, спектроанализаторах, неколлинеарных фильтрах и др [1]. Благодаря чрезвычайно низкой скорости поперечных упругих волн в направлении оси кристалла [110] при анизотропной дифракции реализуется большое значение акустооптического качества  $M_2$ . Вследствие этого такие устройства имеют низкое энергопотребление. При этом эффективность акустооптической дифракции поляризованного света может достигать 90 % и более [6, 7]. Область прозрачности данного кристалла перекрывает весь видимый и ближний ИК-диапазон, поэтому такой кристалл может быть пригоден для решения целого ряда различных задач, связанных с модуляцией излучения в спектральной области ~2000 нм.

## Физические основы акустооптического взаимодействия в кристаллах

В основе работы акустооптических устройств лежит акустооптический эффект. Многие характерные особенности дифракции оптического излучения на акустической волне можно получить с использованием корпускулярно-волновой природы света и звука [5]. Согласно этому представлению дифракцию оптического излучения на акустической волне можно рассматривать как процесс взаимодействия трех частиц: падающего фотона, акустического фонона и дифрагированного фотона. В изотропной среде показатель преломления для оптического излучения не зависит от направления распространения волны и поэтому волновой вектор дифрагированной волны  $\vec{k}_d$  совпадает с вектором падающей волны  $\vec{k}_i$  по модулю. В анизотропной среде показатель преломления для данного оптического излучения зависит от направления его распространения. Поскольку направления распространения дифрагированного пучка, в общем случае, отличается от направления исходного пучка, величины волновых векторов не остаются теперь неизменными. Векторные соотношения акустооптического взаимодействия записываются в виде [7]

$$\begin{aligned}\vec{k}_i^o - \vec{K} - \overline{\Delta\vec{K}} - \overline{\Delta\vec{k}} &= \vec{k}_d^b; \\ \vec{k}_i^b + \vec{K} + \overline{\Delta\vec{K}} + \overline{\Delta\vec{k}} &= \vec{k}_d^o,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_d$  – волновые векторы падающего и дифрагирующего света для обыкновенно и необыкновенно поляризованных лучей;  $\vec{K}$  – волновой вектор звука;  $\overline{\Delta\vec{K}}$  и  $\overline{\Delta\vec{k}}$  – приращение акустического вектора и вектор расстройки соответственно.

Векторная диаграмма, иллюстрирующая соотношение (1), представлена на рис. 1. На этом рисунке показана оптическая ось кристалла [001] и углы Брэгга  $\theta_B^o$  и  $\theta_B^b$ . Акустические волны распространяются в кристалле под углом  $\alpha$  к оптической оси в плоскости акустооптического взаимодействия. Падающая оптическая волна является необыкновенно поляризованной по отношению к оптической оси кристалла.



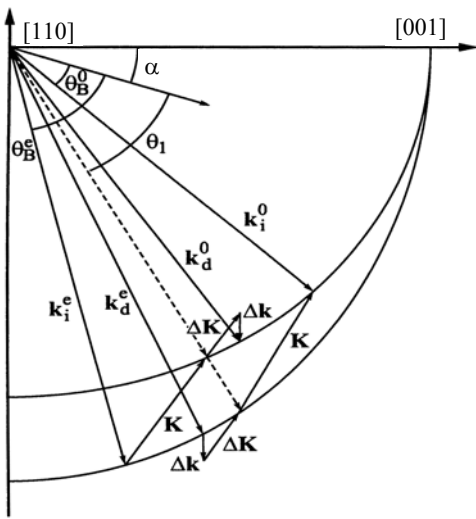


Рис. 1. Векторная диаграмма акустооптического взаимодействия

В соответствии с формулой (1), вектор  $\vec{k}_d^o$  образуется как сумма, а вектор  $\vec{k}_d^e$  – как разность волновых векторов падающей световой и акустической волн. Соотношения для волновых чисел взаимодействующих пучков записываются в виде [7]:

$$\begin{aligned} k &= 2\pi * n_o / \lambda; \\ K &= 2\pi * f / V; \\ \Delta K &= 2\pi * \Delta f / V, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V$  – фазовая скорость звука;  $f$  и  $\Delta f$  – частота акустической волны и ее вариации при нарушении условия синхронизма.

### Расчет параметров акустооптического фильтра

Схема исследуемого акустооптического кристалла, работающего в режиме акустооптического фильтра, приведена на рис. 2. Плоскость пьезопреобразователя составляет угол  $\alpha_2 = 14,3^\circ$  с оптической осью кристалла [001]. Взаимодействие света и звука осуществлялось в режиме анизотропной дифракции Брэгга. Длина кристалла составляла 28 мм, при этом длина пьезопреобразователя – 17 мм и ширина – 1,8 мм. Рабочие грани кристалла имели просветляющее покрытие в области  $\sim 2000$  нм. Одна из граней кристалла была скошена под небольшим углом. Поэтому, в отсутствие высокочастотного сигнала на пьезопреобразователе прошедшее лазерное излучение отклонялось на угол  $\sim 7^\circ$ . При подаче высокочастотного сигнала на пьезопреобразователь направление лазерного излучения на выходе кристалла совпало с направлением падающего.

Важным параметром акустооптического фильтра является спектральная полоса пропускания  $\Delta\lambda$ . Рассчитанная по формуле, приведенной в источнике [8] полоса пропускания данного фильтра в режиме анизотропной дифракции составляет  $\Delta\lambda \sim 5$  нм.

Известно, что кристалл диоксида теллура обладает сильной анизотропией физических свойств [5]. Под анизотропией будем понимать не только оптическую, но и акустическую анизотропию, поскольку в общем случае акустической анизотропией пренебрегать нельзя в силу ее значительной величины. В результате акустической анизотропии, возникает снос акустической энергии относительно плоскости пьезопреобразователя. Направление фазовой и групповой скорости в этом случае не совпадают и образуют угол  $\phi$ .

Угол сноса акустической энергии можно рассчитать по следующей формуле [9]:

$$\phi = \arctg \left( \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \alpha_2} \right), \quad (3)$$

где  $\vartheta$  – скорость медленной звуковой волны в кристалле.

Направление распространения звука (волнового вектора) составляет угол  $\alpha_2 = 14,3^\circ$  с осью кристалла [110]. Скорость звука в этом случае можно рассчитать по формуле [9]:

$$\vartheta = \sqrt{\left( \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \cos^2 \alpha_2 + c_{44} \sin^2 \alpha_2 \right) / \rho}, \quad (4)$$

где  $\vartheta$  и  $c_{ij}$  – плотность и упругие постоянные кристалла.

Подставив значения плотности и упругих постоянных кристалла из справочных данных [4] в формулу (4), получим скорость распространения звука в кристалле в данном направлении  $\vartheta = 795,69$  м/с. Тогда, угол сноса акустической энергии в кристалле, согласно формуле (3) будет равен  $\phi \approx 57^\circ$ .

Расчеты частоты и мощности высокочастотного сигнала проводились для длины волны излучения 2000 нм. Для акустооптического фильтра падающее лазерное излучение являлось необыкновенно поляризованным, а дифрагированное – обыкновенно поляризованным. Для данной длины волны лазерного излучения угол Брэгга составил  $\theta_B^e \approx 20,4^\circ$ . Значения показателей преломления для обыкновенно и необыкновенно поляризованных лучей взяты из [10]. Показатель преломления кристалла для падающего излучения с необыкновенной поляризацией  $n_i$  определяется из уравнения оптической индикатрисы [11]. Для данной ориентации акустооптического взаимодействия показатель преломления падающего излучения на длине волны  $\lambda = 2000$  нм составил  $n_i \approx 2,224$ . Из уравнений анизотропной акустооптической дифракции Брэгга [5] была определена центральная частота ультразвука на данной длине волны лазерного излучения  $f \approx 49,5$  МГц.

По формуле, приведенной в источнике [8] и при учете сноса акустической энергии в кристалле, проводились оценки мощности акустической волны, при которой эффективность акустооптического взаимодействия достигает максимального значения. Согласно проведенным оценкам данное значение мощности акустического сигнала составляет  $P \sim 2$  Вт.



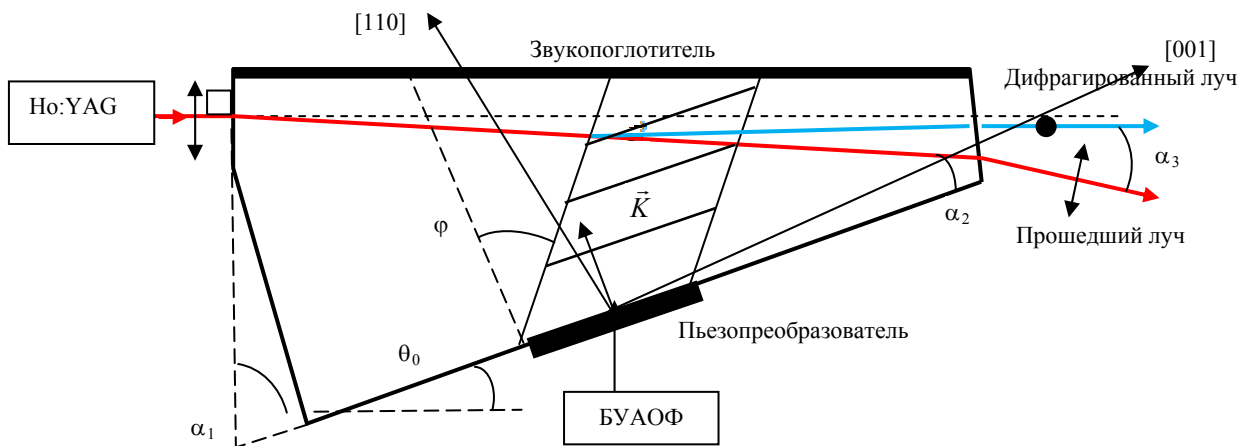


Рис. 2. Схема акустооптического фильтра:  $\alpha_1 = 69,583^\circ$ ;  $\alpha_2 = 14,3^\circ$ ;  $\alpha_3 = 7^\circ$

### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Источником накачки твердотельного гольмиевого лазера служил промышленный волоконный тулиевый лазер ТМ-50. Основная часть выходного

излучения гольмиевого лазера (~99 %) отражалась от пластинки 3 и попадала на вращатель плоскости поляризации 7, который обеспечивал поворот плоскости поляризации на угол  $90^\circ$ . Оставшаяся часть излучения направлялась на отражательную дифракционную решетку 4 и раскладывалась в спектр, который можно было наблюдать с помощью ИК-камеры

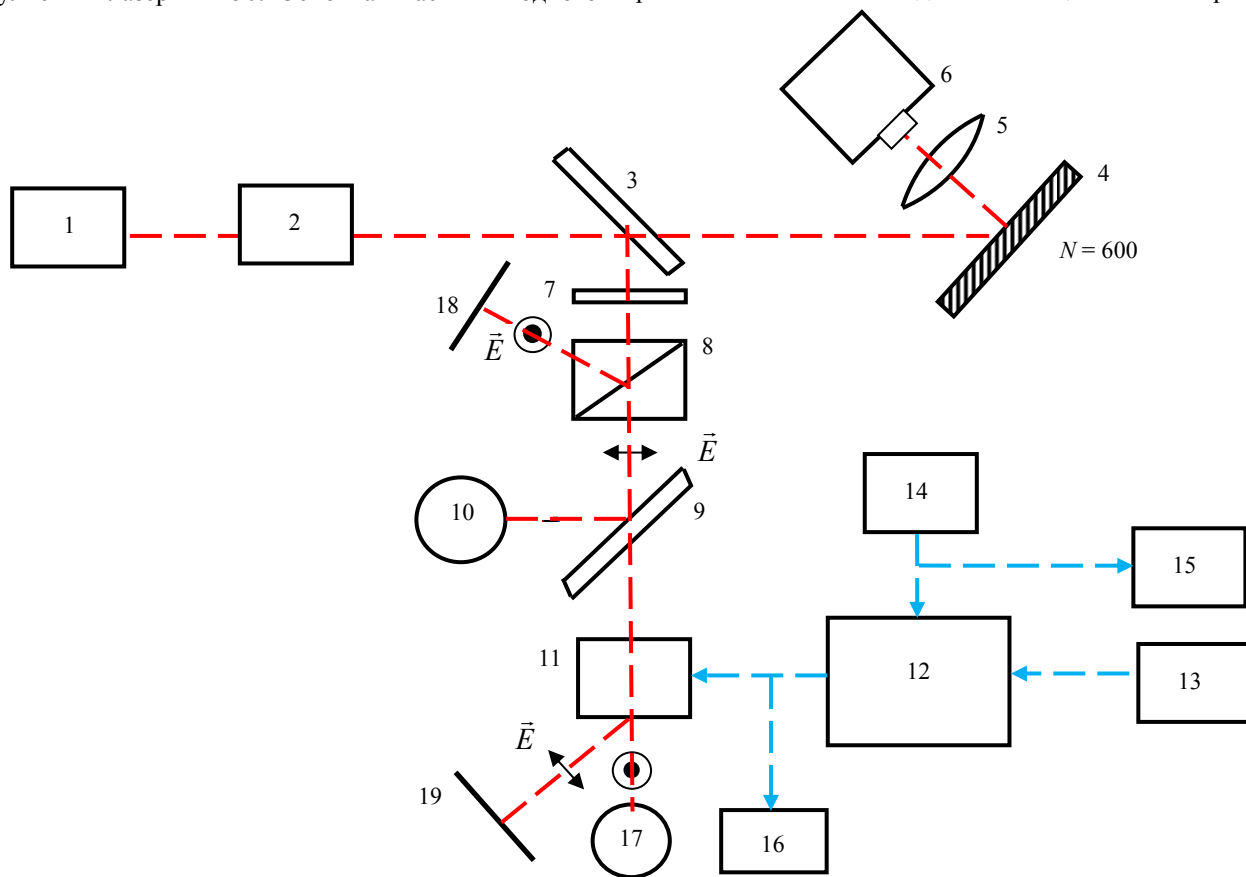


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки (волоконный тулиевый лазер с длиной волны 1908 нм); 2 – твердотельный гольмиевый лазер с длиной волны генерации 2091 и 2097 нм; 3 – отражающая пластинка, коэффициент отражения ~ 99 %; 4 – отражательная дифракционная решетка с числом штрихов  $N = 600$  шт./мм; 5 – положительная линза с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм; 6 – ИК-камера Ругосат 3 с компьютером; 7 – вращатель плоскости поляризации, угол поворота  $90^\circ$ ; 8 – призма Глана; 9 – делительное зеркало; 10, 17 – измеритель мощности лазерного излучения (3 sigma); 11 – акустооптический фильтр (кристалл диоксида теллура); 12 – блок управления акустооптическим фильтром (БУАОФ); 13 – блок питания; 14 – генератор высокочастотных сигналов ГЧ-102А; 15 – частотомер ЧЗ-34; 16 – цифровой осциллограф TDS3000B; 18, 19 – непрозрачный экран

Ругосат 3 и компьютера 6. Это позволяло контролировать спектральный состав излучения лазера. Призма Глана 8 выделяла излучение необыкновенной поляризации, обеспечивая тем самым полную поляризацию излучения. Излучение с обыкновенной поляризацией отражалось и направлялось на непрозрачный экран 18. Делительное зеркало 9 позволяло контролировать падающую мощность лазерного излучения. Отраженная часть излучения падала на измеритель мощности 10, а прошедшая часть – на акустооптический фильтр 11. При отсутствии высокочастотного сигнала излучение попадало на непрозрачный экран 19. При подаче высокочастотного сигнала излучение попадало на измеритель мощности 17.

Источником высокочастотных сигналов служил генератор ГЧ-102А (поз. 14). Максимальное действующее значение амплитуды выходного сигнала такого генератора составляет 0,5 В, что соответствует выходной мощности  $P = 5$  мВт. Сигнал с этого генератора подавался на усилительный каскад блока управления акустооптическим фильтром 12. С выхода блока управления усиленный по амплитуде сигнал поступал на акустооптический фильтр. Амплитуда высокочастотного сигнала контролировалась с помощью цифрового осциллографа 16. Регулировка амплитуды выходного сигнала блока управления БУАОФ осуществлялась изменением выходного напряжения блока питания 13. Для измерения и контроля частоты ВЧ сигнала в схеме был предусмотрен частотомер ЧЗ-34 (поз. 15).

Для определения максимальной эффективности акустооптического взаимодействия значение мощности высокочастотного сигнала  $P$  подаваемой на кристалл варьировалось в диапазоне от 1 до 2 Вт. При этом мощность излучения в направлении дифрагированного луча сравнивалась со значением падающей мощности.

Контраст излучения определялся по отношению освещенностей в направлении дифрагированного луча при включенном и выключенном акустооптическом фильтре. При включенном акустооптическом фильтре мощность лазерного излучения в направлении дифрагированного луча определялась с помощью измерителя и пересчитывалась на освещенность. При выключенном акустооптическом фильтре уровень освещенности в том же направлении определялся с помощью ИК-камеры Ругосат 3, устанавливаемой вместо измерителя мощности 17.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 4 показана экспериментально полученная зависимость мощности лазерного излучения в направлении дифрагированного луча от частоты высокочастотного сигнала в диапазоне от 49,2 до 49,6 МГц. Мощность высокочастотного сигнала поддерживалась на постоянном уровне и составляла  $P = 1,3$  Вт. Эксперименты показали, что центральная частота высокочастотного сигнала для длины волны 2091 нм, при которой на-

блюдается максимум мощности лазерного излучения в дифрагированном луче составляет  $f_0 \approx 49,41$  МГц. Полученное значение  $f_0$  достаточно хорошо согласуется с расчетным значением  $f_p \approx 49,5$  МГц.

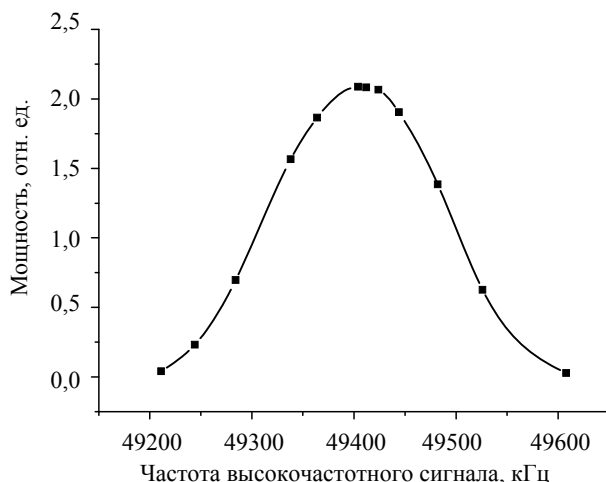


Рис. 4. Зависимости мощности лазерного излучения в направлении дифрагированного луча от частоты высокочастотного сигнала

При значении мощности высокочастотного сигнала  $P \approx 1,7$  Вт на частоте  $f_0$  мощность лазерного излучения в направлении дифрагированного луча достигала максимального значения. При этом максимальное значение эффективности акустооптической дифракции поляризованного излучения на длине волны 2091 нм составило  $\zeta = 96$  %. Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с частично поляризованным оптическим излучением и с излучением, имеющим в своем составе две длины волны. При исследовании акустооптической дифракции с частично поляризованным оптическим излучением (без призмы Глана) на длине волны 2091 нм, максимальная эффективность равнялась  $\zeta_1 = 90$  %. При наличии в излучении двух длин волн 2091 и 2097 нм с определенным соотношением энергии, эффективность акустооптического фильтра уменьшалась до значения  $\zeta_2 = 48$  %.

Определение контраста производилось при фиксированной выходной мощности лазера, которая составляла  $\sim 1,5$  Вт. Освещенность в направлении дифрагированного луча при включенном (наличие высокочастотного сигнала на пьезопреобразователе) акустооптическом фильтре составила  $E = 0,7$  Вт/мм<sup>2</sup>. В отсутствие высокочастотного сигнала на акустооптическом фильтре, лазерное излучение в направлении дифрагированного луча зафиксировать не удалось. Поэтому, можно считать, что уровень оптического излучения не превосходит уровня чувствительности фотоприемного устройства. В данном случае уровень чувствительности ИК-камеры составляет  $E_{\min} = 22$  мкВт/мм<sup>2</sup>. Следовательно, отношение максимального и минимального значений освещенности (глубина модуляции) составляет  $k > 3 \times 10^4$ , что соответствует контрасту излучения  $M > 99,994$  %.

## Закключение

В работе проведено исследование амплитудной модуляции излучения Ho:YAG с помощью акустооптического фильтра на основе кристалла диоксида теллура. Оценены и экспериментально определены основные параметры акустооптического фильтра для длины волны лазерного излучения 2091 нм. Центральная частота акустической волны составила  $f \approx 49,41$  МГц, а мощность, при которой наблюдается максимальная эффективность акустооптического взаимодействия –  $P \approx 1,7$  Вт. Эффективность акустооптической модуляции поляризованного одночастотного лазерного излучения при этом достигала 96 %. Исходя из полученных экспериментальных данных, определена глубина модуляции лазерного излучения –  $k > 3 \times 10^4$ , что соответствует контрасту излучения  $M = 99,994$  %.

Проведенные исследования показали, что с помощью данного акустооптического фильтра возможно высокоэффективное управление параметрами лазерного излучения в спектральной области ~ 2000 нм с высоким контрастом излучения на выходе.

## Литература

1. Грачев С. В. Гольмиевый лазер в медицине // Москва, Изд-во: Триада-Х, ISBN: 5-8249-0102-3(I). 2003.

2. Buzug T. M., Bongartz D. J., Hartmann M. U. and S. Weber. Design and Technical Concept of a Tm Laser Scalpel for Clinical Investigation Based on a 60W, 1.92  $\mu\text{m}$  Tm Fiber Laser System // Advances in Medical Engineering, 114. 2007. P. 447–452.

3. Henderson S. W., Hale C. P., Magee J. R., Kavaya M. J., and Huffaker A. V. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 using Tm, Ho:YAG-lasers // Opt. Lett. 1991. 16(10). P. 773–775.

4. Budni P. A., Pomeranz L. A., Lemons M. L., Miller C. A., Mosto J. R. and Chicklis E. P. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators // J. Opt. Soc. Am. B. 2000. 17(5). P. 723–728.

5. Балакший В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. И. Чирков. М.: 2000.

6. Антонов С. Н. Анизотропный акустооптический модулятор неполяризованного света на медленной световой волне в кристалле парателлуриита / С. Н. Антонов, В. И. Миргородский // Журнал технической физики. Т. 74. Вып. 1. 2004.

7. Волошинов В. Б. Акустооптический неполяризованного электромагнитного излучения / В. Б. Волошинов, В. Я. Молчанов, Т. М. Бабкина // Журнал технической физики. Т. 70. Вып. 9. 2000.

8. Магдич Л. Н. Акустооптические устройства и их применения / Л. Н. Магдич, В. Я. Молчанов. М.: 1978.

9. Зубринов И. И. Широкополосный акустооптический фильтр / И. И. Зубринов, В. К. Сапожников, Д. В. Шелопут // Журнал технической физики. Т. 67. Вып. 6. 1997.

10. Акустооптические кристаллы [Электронный ресурс] / МГУ – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. М. Режим доступа <http://acustooptics.physic.mgu.ru>, свободный.

11. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх / Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЮЩИХ СИГНАЛОВ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ МАГНИТОГЕНЕРАТОРА

С. В. Наумова, А. И. Кедров, А. В. Голубев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При исследовании влияния электромагнитного поля (ЭМП) на биообъекты различного уровня системной организации требуется не только обеспечить теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение биоэффективности того или иного вида ЭМП, но и обеспечить необходимые параметры в рабочей зоне генератора.

Целью работы является сформировать задающий сигнал генератора таким образом, чтобы с учетом характеристик входящих в генерирующий комплекс устройств обеспечить требуемые биоэффективные параметры ЭМП в его рабочей зоне.

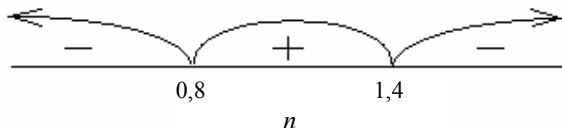
Объектами исследования влияния ЭМП в НИО-48 являются биологические объекты.

Сложномодулированный сигнал, используемый нами в биофизических экспериментах, представляет собой сигнал со сложной амплитудной модуляцией. Форма модулирующего сигнала выбирается на основании условий эксперимента.

Одним из наиболее изученных параметров, который является индикатором адаптационно-приспособительной деятельности целостного организма, является закономерность флуктуаций сердечного ритма.

В ранних исследованиях [1, 2], описанных в литературе и в наших собственных, было показано, что огибающие спектров хаотических флуктуаций частоты сердечных сокращений (ЧСС) биологических объектов (таких как человек, свиньи, крысы, мыши) в состоянии покоя описываются зависимостью вида  $Y(f) = mf^{-n}$ , где показатель степени  $n$  колеблется от 0,8 до 1,4 (рис. 1 и его огибающие).

вии, что огибающая спектра модулирующего сигнала имеет вид  $U(t) = mf^{-n}$ , будет вызывать различные ответные физиологические изменения в организме. Особенно это будет выражено на границе областей.



Для получения подтверждения этого предположения и соответствующего заданного биоэффекта необходимо было проведение экспериментальных работ в разных диапазонах  $n$ . Формирование задающих сигналов генераторов ЭМП и оптимизация их параметров осуществляется с учетом предварительно зарегистрированных ритмологических характеристик объектов исследования и имеющихся данных о технических возможностях и характеристиках аппаратуры, используемой при формировании ЭМП.

На основании чего необходимо было смоделировать задающий сигнал ЭМП, спектральная плотность которого зависит от частоты по закону  $f^{-n}$ , и подобрать его параметры таким образом, чтобы обеспечивать создание условий комфортного либо дискомфорта состояния организма в зависимости от его собственных ритмологических характеристик.

Работы проводились в радиодиапазоне нетепловой интенсивности от сверхнизких до сверхвысоких частот, и в качестве задающего сигнала ЭМП использовали сложномодулированный импульсный сигнал.

В работе представлены используемые математические методы обработки, моделирования и расчета параметров управляющего сигнала для формирования ЭМП.

Представленная методика ориентирована на подбор параметров ЭМП как индивидуально для отдельного объекта, так и для группы объектов, сходных по физиологическому строению.

Для реализации задающих сигналов был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий подбирать параметры сигнала в соответствии с предъявленными требованиями к ЭМП, а также учитывая технические параметры аппаратуры.

При формировании сложномодулированного сигнала, где каждый изначальный сигнал имеет свои параметры, необходимо было учесть неизбежное искажение формы одного из них, что в свою очередь приводит к искажению спектрального представления результи-

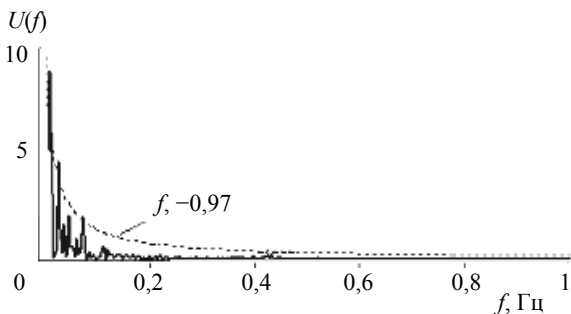


Рис. 1. Функции распределения (спектра) флуктуаций частоты сердечных сокращений человека в состоянии покоя и его огибающие

Основываясь на данной теории можно предположить, что воздействие импульсным магнитным полем (ИМП) с различными параметрами при усло-

рующего сигнала [3]. А как было сказано ранее, основным критерием для подбора и формирования задающего сигнала ЭМП является значение параметра  $n$  функции  $U(t) = mf^{-n}$  огибающей спектра сигнала.

То есть чтобы получить импульсное ЭМП заданного биоэффекта, необходимо провести подбор и коррекцию исходных задающих сигналов.

Первоначально у нас имеются два разных сигнала, один из которых моделирующий (период которого  $T_m$ ) и моделируемый импульсный сигнал (период которого  $T_n$ ).

Если фиксировать длительность периода модулирующего сигнала  $T_m$  и его форму, в модулируемом  $T_n$  сигнале появятся импульсы случайной длины и формы. Если же сохранить форму модулируемого сигнала, придется скорректировать форму и период модулирующего сигнала.

Учитывая появление случайных импульсов и, соответственно, искажений в спектральном представлении итогового сигнала, то более предпочтительным является корректировка формы и периода  $T_m$  модулирующего сигнала с точностью до периода модулируемого  $T_n$ .

В проводимых нами работах несущий сигнал высокочастотного генератора модулировался после-

довательностью монополярных прямоугольных импульсов. Амплитуда полученного таким образом сигнала модулировалась еще раз другим низкочастотным сигналом.

На рис. 2 представлен пример импульсных прямоугольных сигналов и их модуляция сигналом в виде последовательности прямоугольных импульсов.

При формировании сигнала выяснилось, что при несовпадении начала и окончания фронтов прямоугольных импульсов и импульсов второй низкочастотной модуляции, а также изменение начальной фазы первого импульса приводит к искажению формы модулируемого сигнала. К тому же величина задаваемого периода модуляции модулирующего сигнала  $T_m$ , не зависит от периода модулируемого сигнала  $T_n$ , а значит, не всегда в период  $T_m$  уложится целое количество прямоугольных импульсов. Все это приводит к появлению в результирующем сигнале импульсов случайной длительности и формы, и вносит существенные искажения в спектр итогового сигнала.

На рис. 3 приведен пример отрезка сигнала в момент изменения формы модулирующего сигнала и его спектр.

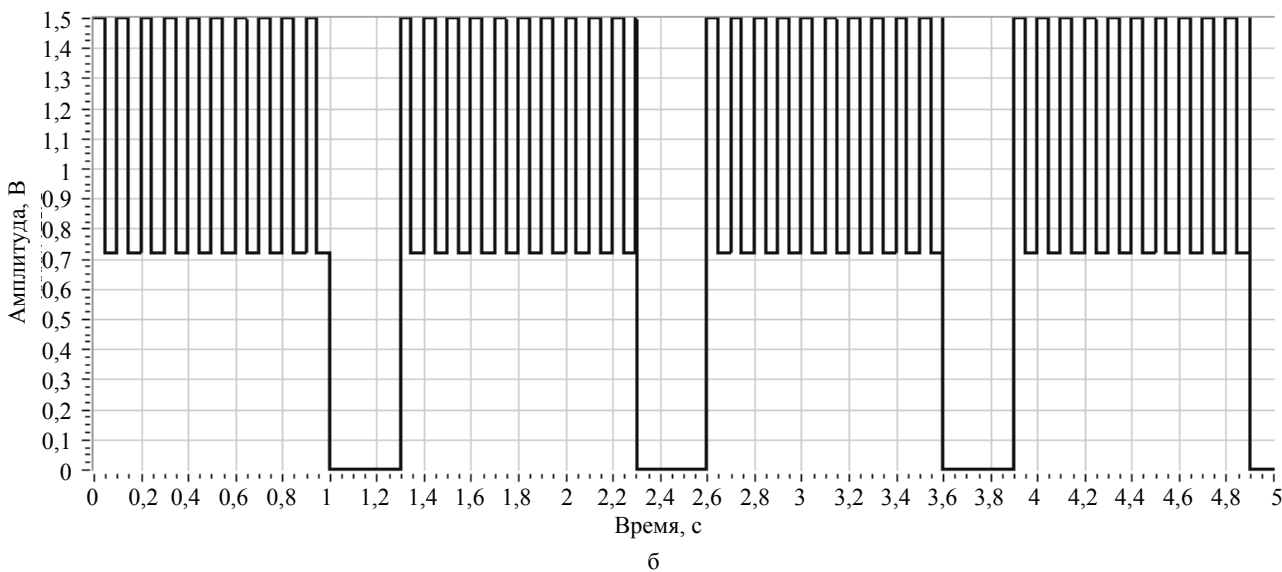
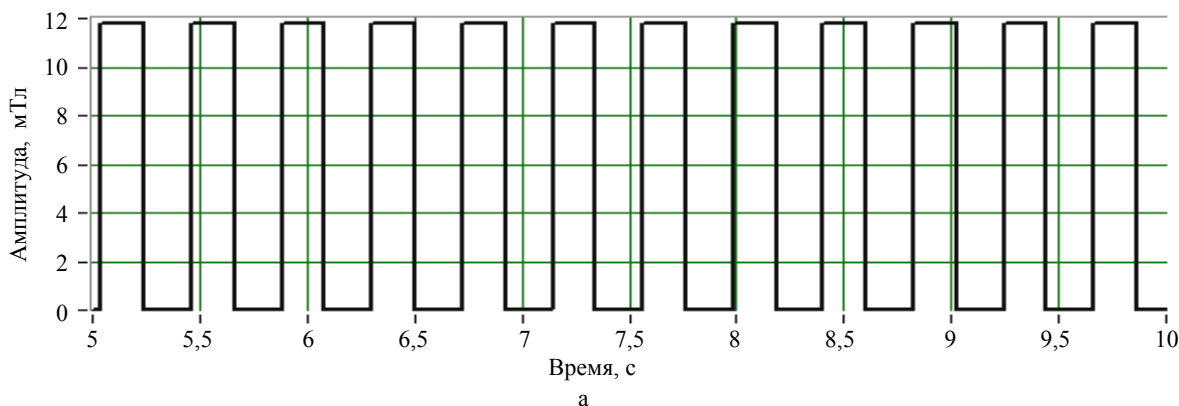


Рис. 2. Форма импульсов модулирующих амплитуду высокочастотного сигнала (а) и форма периода сигнала последующей амплитудной модуляции (б)

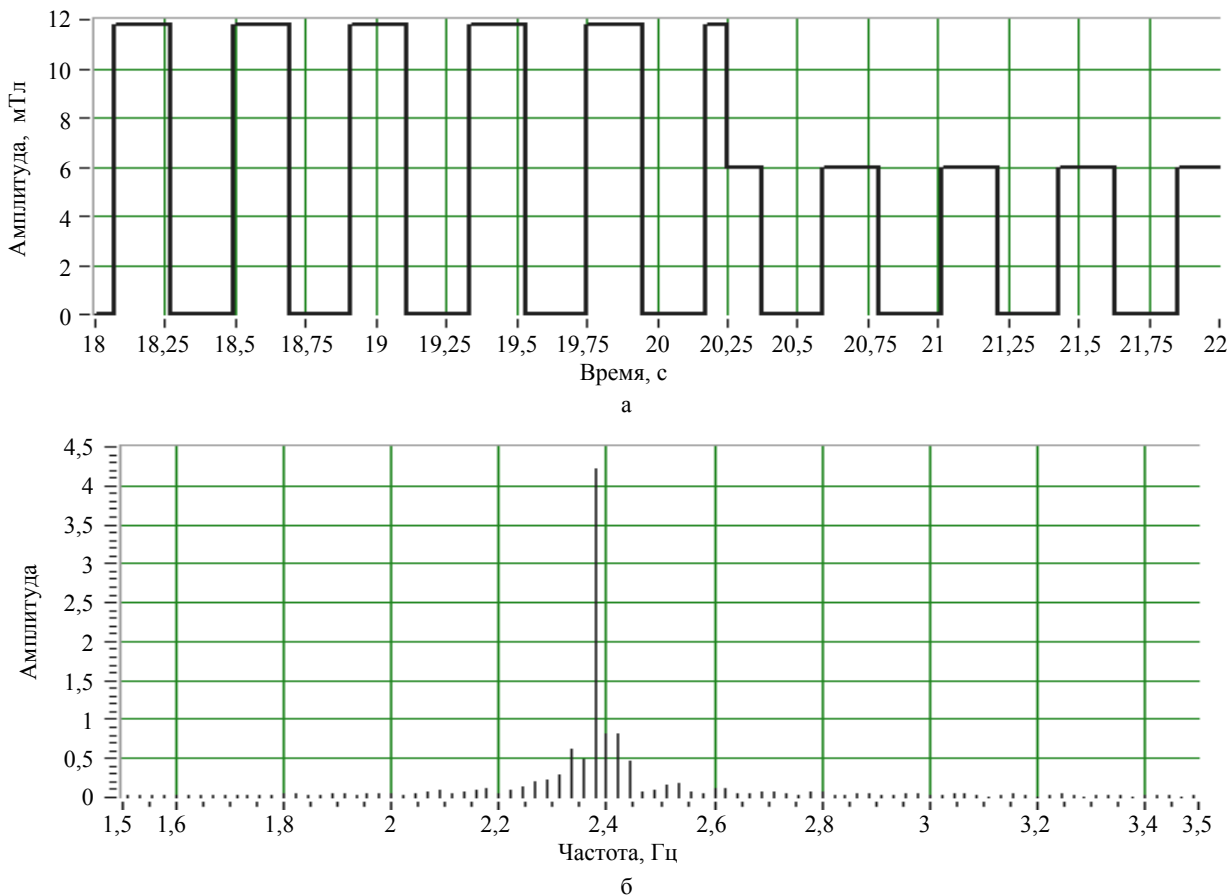


Рис. 3. Отрезок промодулированного сигнала (а) и спектр целого периода итогового сигнала (б)

С целью избежать подобных искажений формы модулируемого сигнала, необходимо скорректировать длины каждого отрезка модулирующего сигнала таким образом, чтобы они соответствовали целому количеству импульсов модулируемого сигнала, т. е. были кратны периоду следования прямоугольных импульсов  $T_{и}$ .

Это, в свою очередь, приведет к небольшому (в пределах  $T_{и}$ ) искажению формы уже модулирующего сигнала, что, однако, не сильно отразится на спектре итогового сигнала.

Таким образом отрезок скорректированного сигнала и спектр периода итогового сигнала приведен на рис. 4(а, б).

При формировании задающих сигналов необходимо также учитывать ограничения, связанные с техническими параметрами аппаратуры. Так, например, нами предварительно строились характеристики зависимости значения сигнала генератора на входе от напряжения ЭМП (рис. 5). И таким образом задающий сигнал формировали в линейной области зависимости напряженности ЭМП в зоне воздействия от напряжения подаваемого на вход генератора.

Как было сказано выше, основным критерием выбора сигнала для формирования импульсного ЭМП было определение параметра  $n$  функции  $U(t) = mf^{-n}$ . Спектральное распределение сложномодулированно-

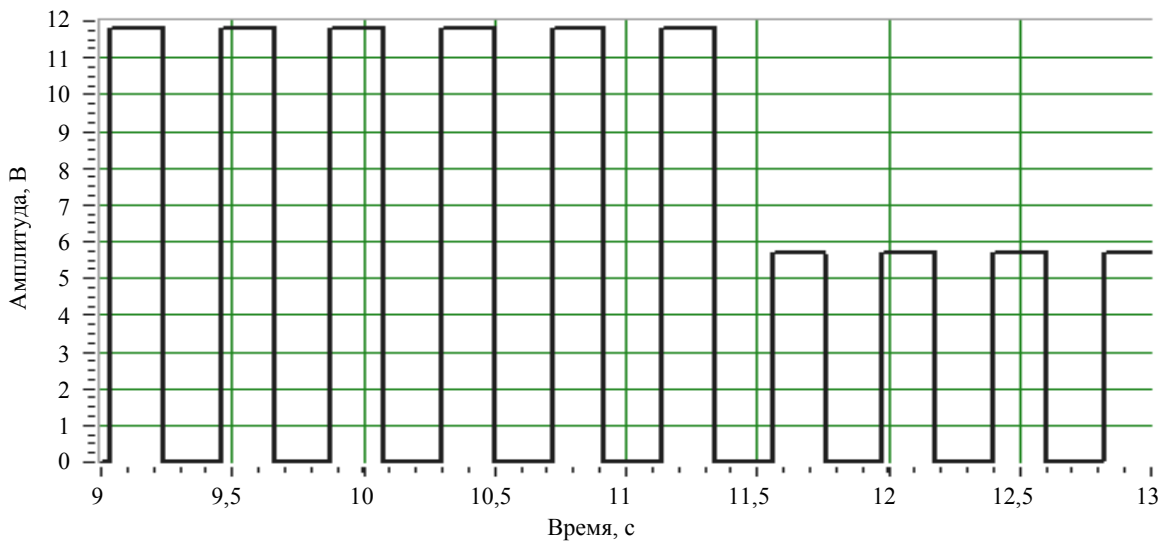
ного импульсного сигнала аппроксимировали степенной функцией и методом наименьших квадратов вычислялось значение  $n$ .

На рис. 6 приведен график спектрального распределения мощности сигнала и его огибающей.

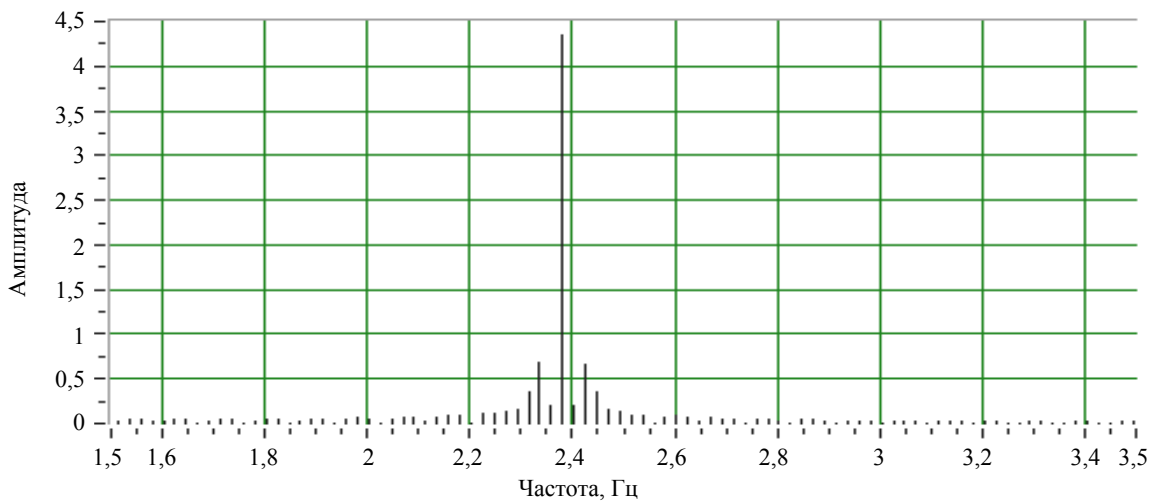
Теория спектрального анализа основана на том положении, что исследуемый сигнал имеет бесконечную длительность [4]. Действительные сигналы ограничены во времени. Это равносильно умножению сигнала на прямоугольную функцию, называемую естественным временным окном и вносит искажения в форму спектрального представления. Чем длиннее сигнал, тем меньше погрешность в вычислении показателя  $n$ .

На рис. 7–10 представлены графики спектрального представления программно-формируемого сигнала на входе используемого нами генератора ЭМП и сигнала регистрируемого миллитесламетром в рабочей зоне. А также показаны рассчитанные показатели степенных функций, аппроксимирующих первые гармоники в спектрах этих сигналов и достоверность такой аппроксимации.

На рис. 11 представлен пример графика распределение значения параметра  $n$  в зависимости от периода сигнала при постоянной длительности прямоугольных импульсах и пауз между ними. Из графика видно, что при увеличении периода сигнала разброс изменения значения параметра  $n$  уменьшается.



а



б

Рис. 4. Отрезок промодулированного сигнала после корректировки формы модулирующего сигнала (а) и спектр целого периода итогового сигнала (б)

ППЭ при усилении 20 %, 30 % и 100 %

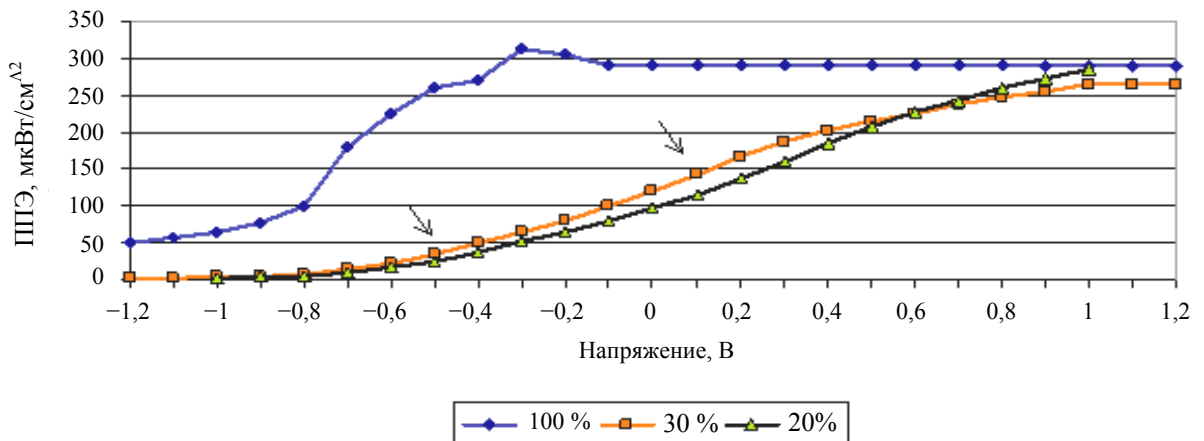


Рис. 5. Пример изменения значения ППЭ от напряжения на входе задающего генератора



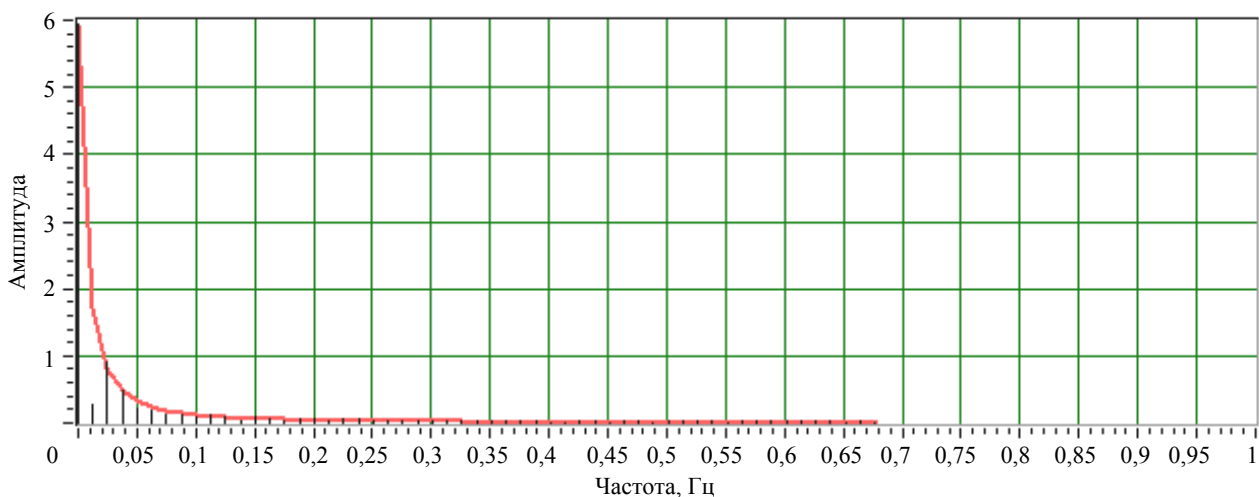


Рис. 6. Спектр мощности сигнала и его огибающая

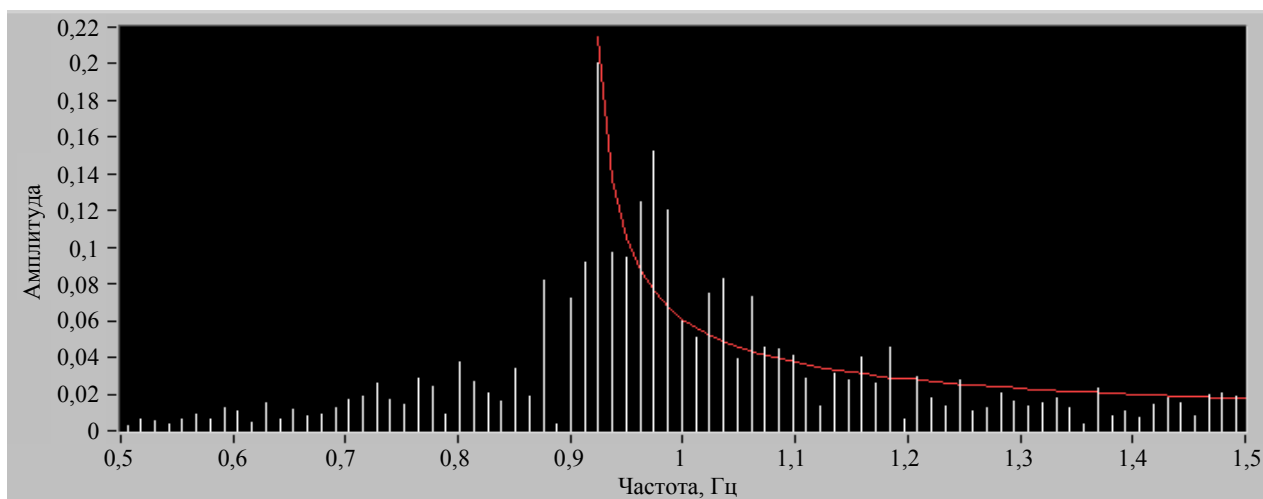


Рис. 7. Вид первой гармоники и аппроксимирующей кривой сформированного управляющего сигнала

Показатель степени аппроксимирующей функции  $n = 0,65$ .  
 Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,80$

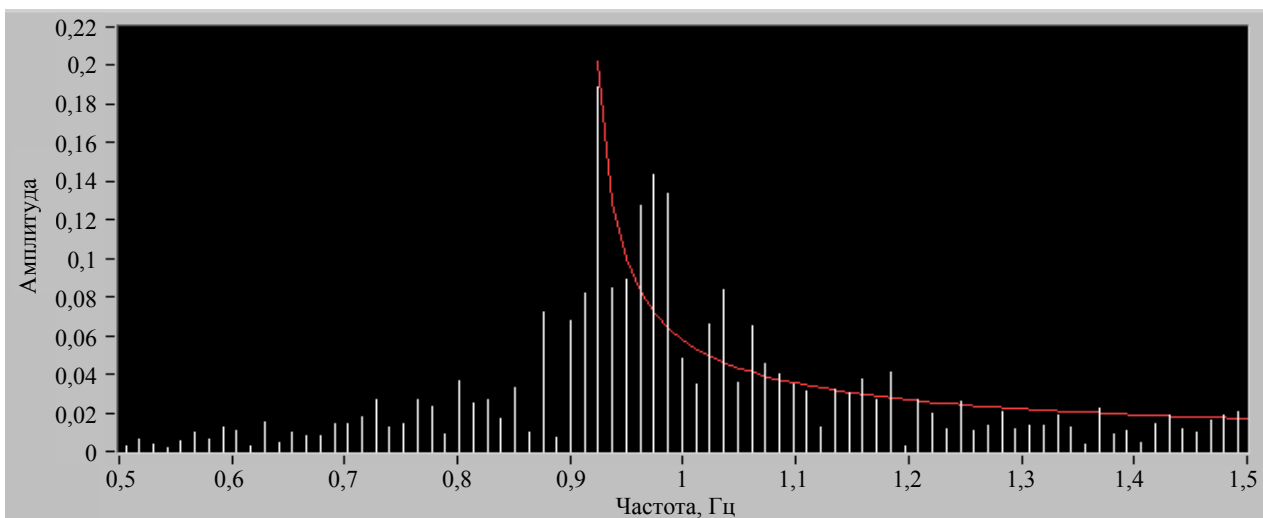


Рис. 8. Вид первой гармоники и аппроксимирующей кривой сигнала, зарегистрированного в рабочей зоне

Показатель степени аппроксимирующей функции  $n = 0,64$ .  
 Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,77$

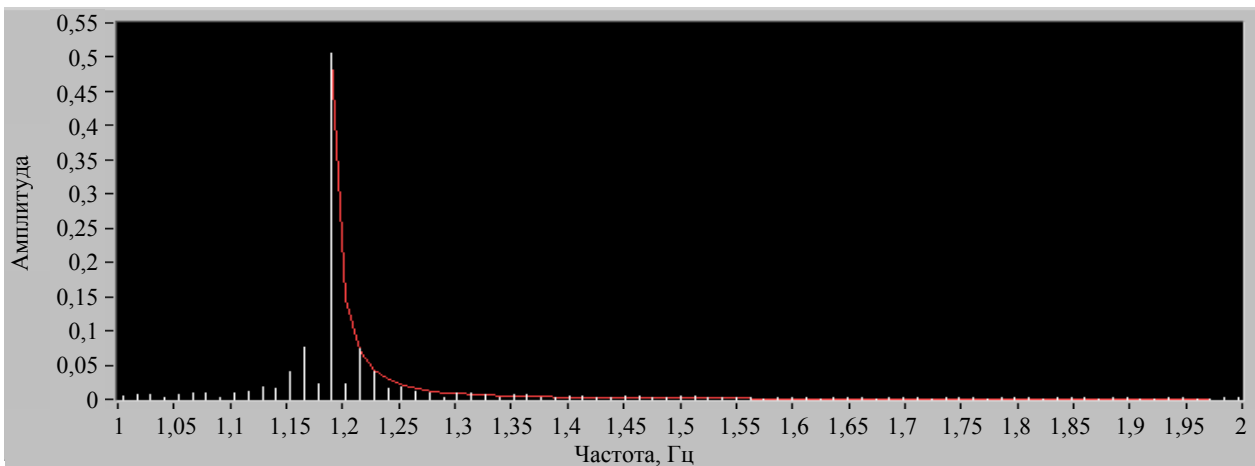


Рис. 9. Вид первой гармоники и аппроксимирующей кривой сформированного управляющего сигнала

Показатель степени аппроксимирующей функции  $n = 1,79$ .  
 Достоверность аппроксимации (метод Пирсона)  $R^2 = 0,94$

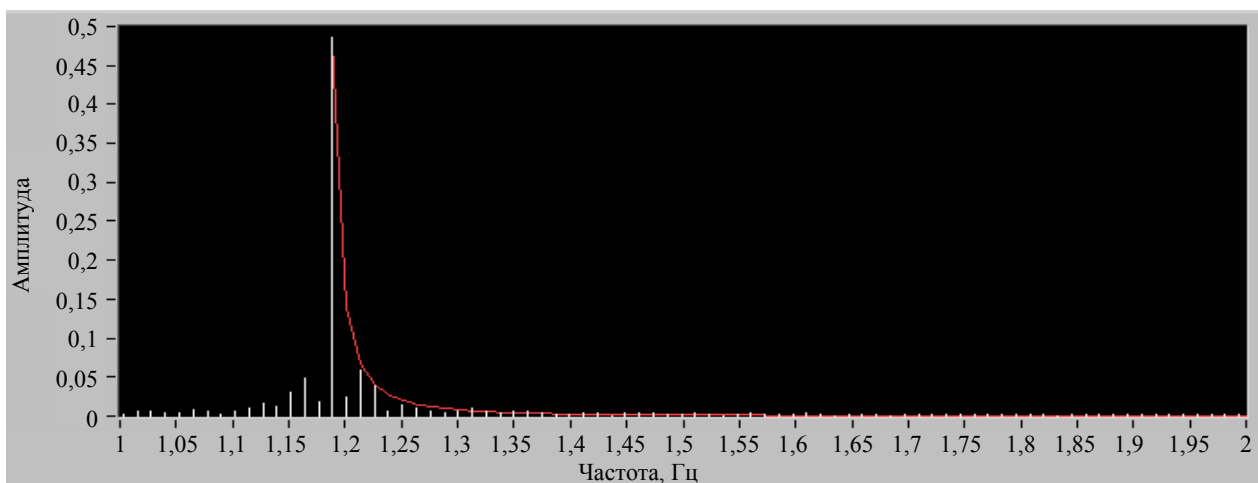


Рис. 10. Вид первой гармоники и аппроксимирующей кривой сигнала, зарегистрированного в рабочей зоне

Показатель степени аппроксимирующей функции  $n = 0,79$ .  
 Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9477$

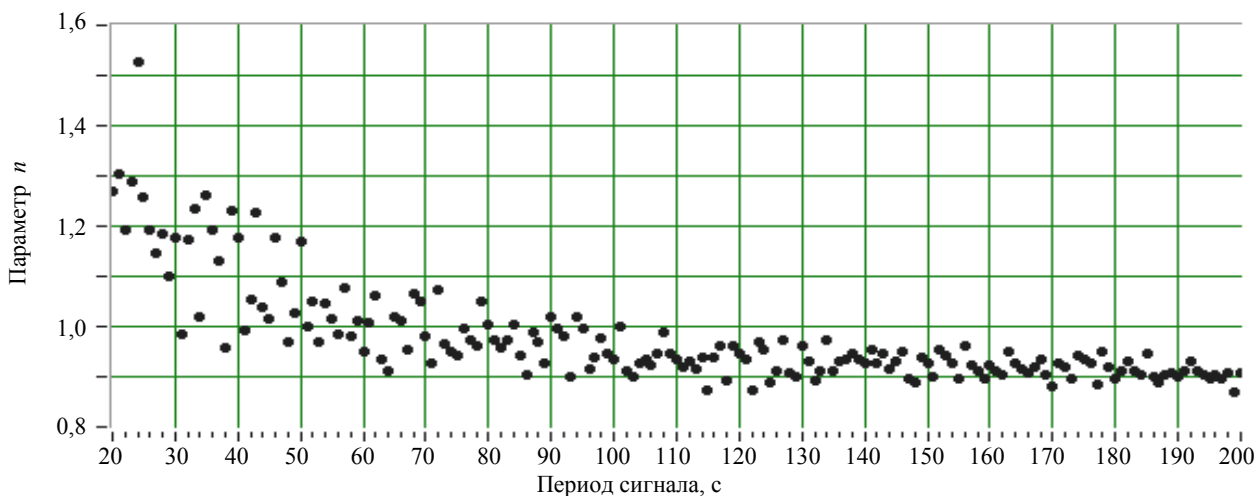


Рис. 11. Распределение значения параметра  $n$  в зависимости от периода сигнала

На следующем графике (рис. 12) показан пример огибающих соответствующие распределению

ЧСС исследуемого животного и выбранного для него задающего сигнала ЭМП.

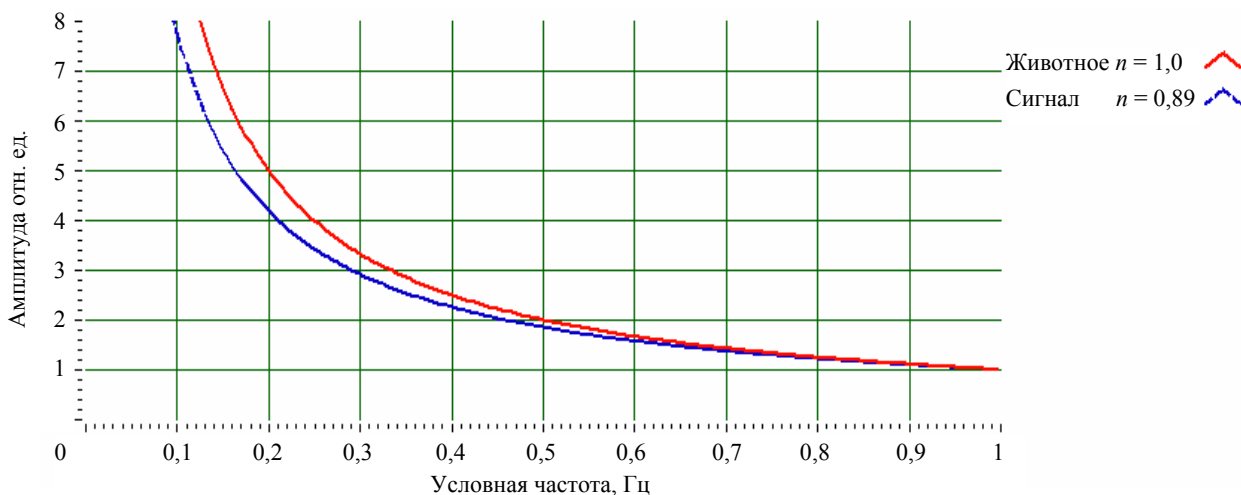


Рис. 12. Огибающие соответствующие распределению ЧСС исследуемого животного и выбранного для него задающего сигнала ЭМП

### Заклучение

Представленная методика позволяет осуществлять подбор параметров ЭМП как индивидуально для отдельного объекта, так и для группы объектов, сходных по физиологическому строению.

Для обеспечения необходимых биоэффетов необходимо осуществлять формирование задающих сигналов генераторов ЭМП и оптимизацию их параметров с учетом предварительно зарегистрированных ритмологических характеристик объектов исследования и имеющихся данных о технических возможностях и характеристиках аппаратуры, используемой при формировании ЭМП.

### Литература

1. Фролов М. В. Исследование состояний открытых систем: динамический подход // Методическое и техническое обеспечений психофизического эксперимента: Сборник статей. М.: Наука, 1993. С. 3–14.
2. Шноль С. Э., Коломбет В. А. О реализации дискретных состояний в ходе флуктуаций в макроскопических процессах // УФН. 1998. Т. 168, № 10. С. 96–109.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.

И. В. Ошкин, К. В. Троцюк

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В вакуумной сверхвысокочастотной электронике наиболее часто в качестве генератора монохроматических колебаний используется лампа обратной волны (ЛОВ). Первоочередной задачей при разработке ЛОВ с требуемыми параметрами является определение минимального (стартового) значения тока электронного пучка, при котором электронная мощность взаимодействия пучка с обратной пространственной гармоникой замедляющей системы (ЗС) окажется больше, чем мощность, обусловленная потерями. Это приводит к возникновению незатухающих колебаний с частотой, которая определяется дисперсией ЗС и скоростью электронов.

Целью данной работы являлось определение режимов генерации на физической установке, в которой в качестве ЗС была выбрана структура, состоящая из трех связанных спиральных резонаторов с устройством вывода энергии в виде спирали, расположенной в начале первого резонатора по пучку, с продольным участком. Данная ЗС обладает наибольшим сопротивлением связи в определенном диапазоне частот и большой широкополосностью при минимально возможных габаритах [1, 2].

Экспериментальное исследование стартовых токов генерации проводилось в два этапа. На первом этапе определялись требуемые геометрические размеры ЗС и дисперсия в полосе рабочих частот. На втором этапе на экспериментальной установке определялась зависимость стартовых токов от ускоряющего напряжения.

Первоначально в результате численных расчетов определили геометрию ЗС с требуемыми значениями коэффициента замедления. Экспериментальное измерение дисперсионной характеристики (ДХ) ЗС проводилось по схеме, представленной на рис. 1. С помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи снималась зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  от частоты  $f$ . При этом каждый резонатор настраивался на центральную частоту  $f_0$ . В системе использовалась структура, состоящая из трех резонаторов, поэтому в первой полосе пропускания наблюдается наличие трех ярко выраженных резонансов, на частоте которых сдвиг фазы на периоде ЗС равен  $\pi$ . На рис. 2 приведено изображение экрана дисплея измерителя S-параметров, на котором показана зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  от нормированной частоты  $f/f_0$ .

Зная значение частоты  $f$  и номер максимума коэффициента передачи  $S_{21}$  на этой частоте согласно методу резонансов [3] можно определить коэффици-

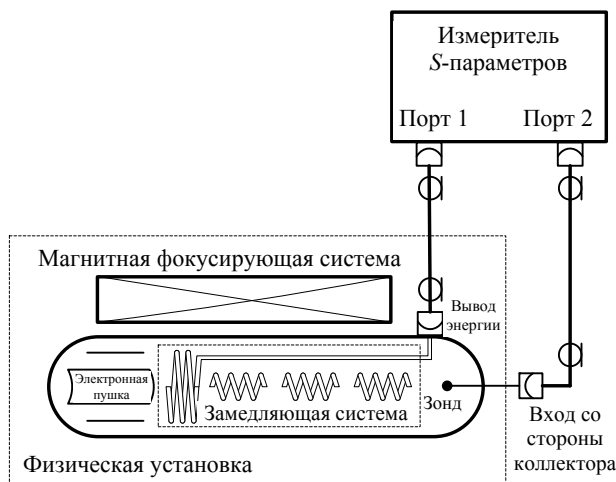


Рис. 1. Блок-схема эксперимента для определения дисперсионной характеристики ЗС

ент замедления для каждой из резонансных частот. Полученные значения коэффициента замедления позволяют на основе строгой линейной теории ЛОВ вычислить в первом приближении диапазон значений ускоряющего напряжения, в котором возможна генерация колебания на полученных резонансных частотах [4]. На рис. 3 представлены теоретическая и экспериментальная ДХ, а также рассчитанный диапазон ускоряющих напряжений в пределах полосы частот.

Для проведения измерений была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 4. Выходной сигнал с физической установки поступает через направленный ответвитель на цифровой осциллограф, анализатор спектра и ваттметр поглощаемой мощности.

На рис. 5 представлен график зависимости стартовых токов от ускоряющего напряжения. Согласно кривым для каждой резонансной частоты существует своя зона генерации колебаний. При этом наблюдается асимметрия зон генерации: крутизна низковольтного фронта зоны выше крутизны высоковольтного. Резонансный характер ЗС приводит к появлению ярко выраженного минимума, который сохраняется при достаточно большом изменении ускоряющего напряжения. Меньшее значение стартового тока на частоте  $f_2$  связано с большей добротностью резонатора на этой частоте. Следует обратить внимание на наличие области пересечения кривых, в которой при одном значении напряжения ( $U_0 \approx 4,5$  кВ) начинается генерация на двух резонансных частотах.

В этом случае в генераторе имеет место двухчастотный режим, а отношение минимального стартового тока к максимальному равно 4.

В результате экспериментальных исследований определены зоны моногенерации и показана возможность генерации многочастотных сигналов в ЛОВ резонансного типа.

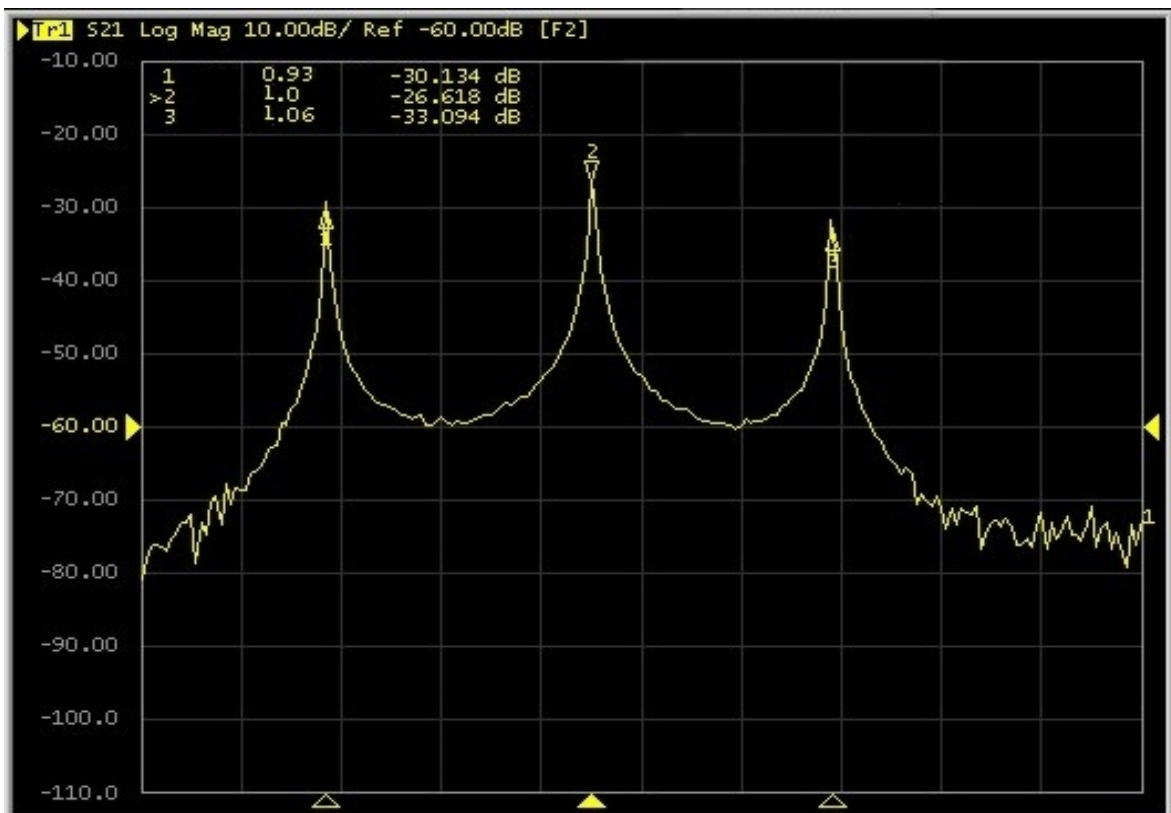


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи от частоты

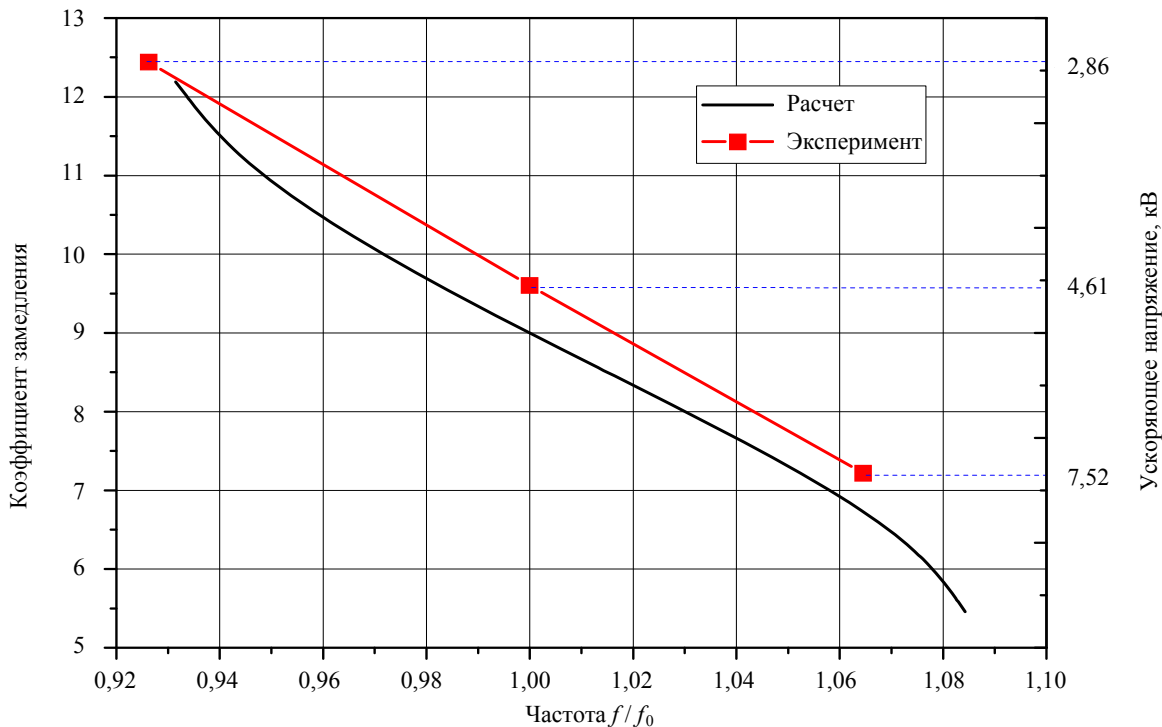


Рис. 3. Дисперсионная характеристика ЗС

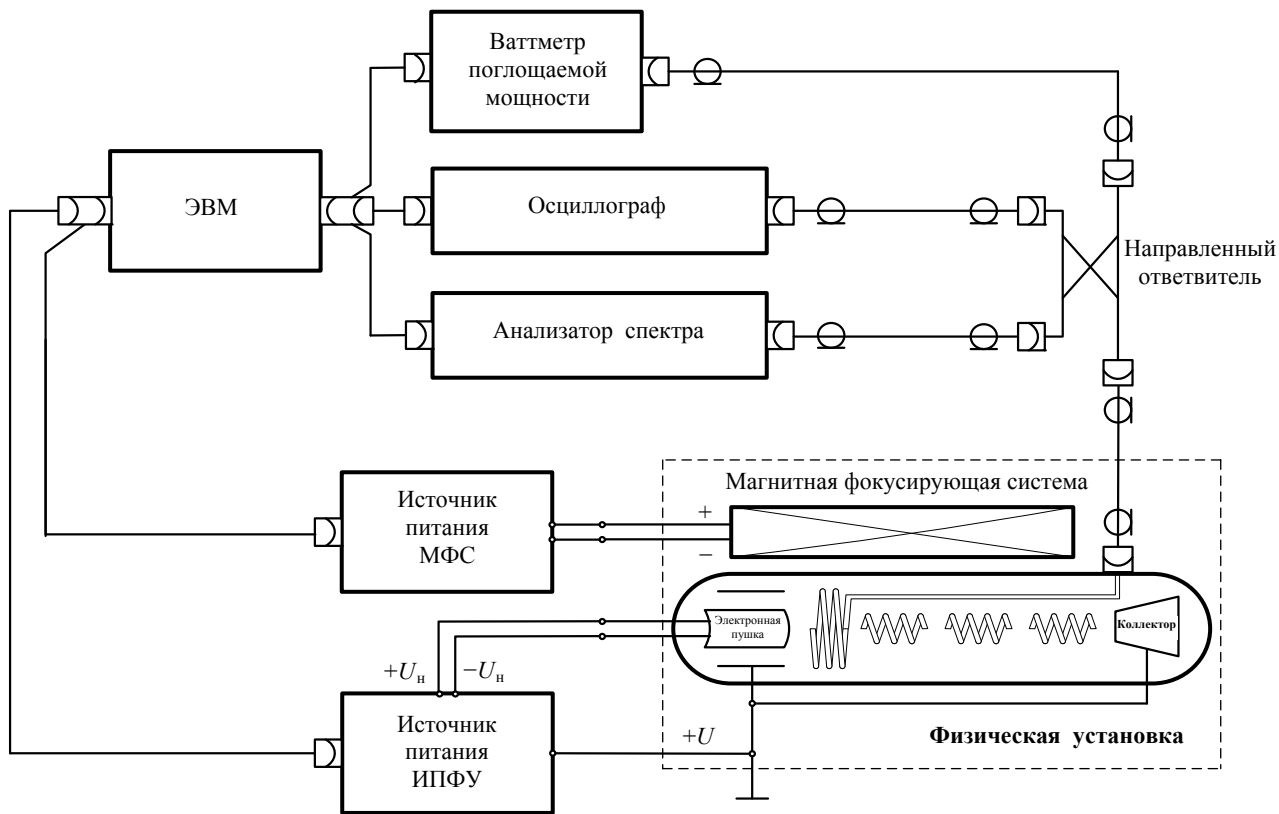


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для определения стартовых токов

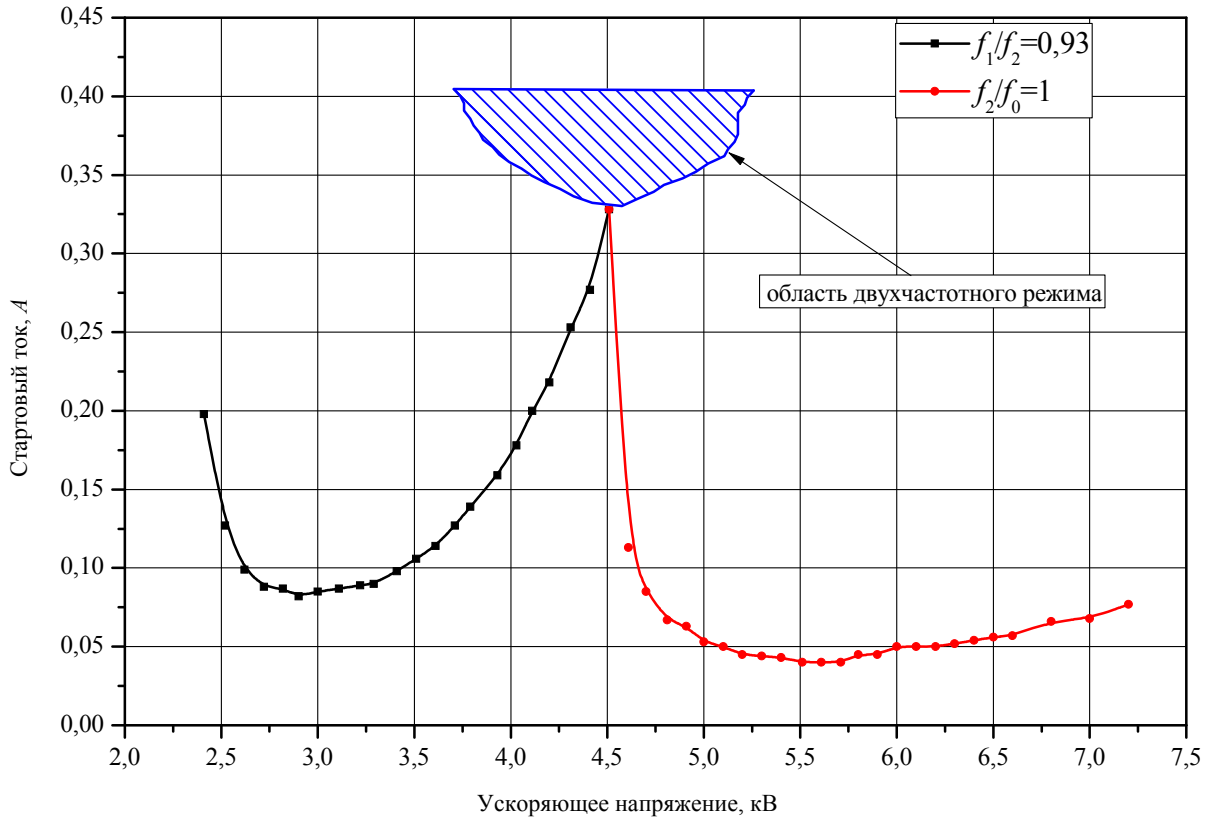


Рис. 5. Зависимость стартовых токов от ускоряющего напряжения

## Литература

1. Силин Р. А. Периодические волноводы. М.: Фазис. 2002.

2. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Определение дисперсионной характеристики замедляющей системы типа цепочка связанных спиральных резонаторов // Вестник Саровского Физтеха, 2007. № 13–14. С. 64–69.

3. Троцюк К. В., Профе В. Б., Астайкин А. И., Мартынов А. П. Метод резонансов для измерения дисперсионной характеристики цепочки связанных резонаторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Т. 1 / Под ред. Р. И. Илькаева. Саров, 2001. С. 468–473.

4. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.



# ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ БЫСТРОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА КАЛОРИМЕТРА

*А. Н. Панченко, Б. В. Цыганков, Ю. Г. Кудрявцев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время на моделирующих установках (МУ), генерирующих импульсное тормозное или электронное излучение, проводится большое количество физических исследований и испытаний изделий электронной техники. Наряду с различными методами дозиметрии в этих экспериментах используются калориметры, которые измеряют поглощенную энергию излучения в рабочем теле. Контролируемым параметром при этом является температура рабочего тела, а датчиками температуры – термопары и термометры сопротивления. В данной работе термометр сопротивления на основе керамического терморезистора с большим температурным коэффициентом одновременно выполняет роль рабочего тела.

Электронная система для быстрого измерения температуры рабочего тела калориметра основана на преобразовании R–F (сопротивление – частота). Учитывая специфику проводимых экспериментов на МУ, электронная система разработана с учетом блочно-модульного принципа и состоит из калориметрического детектора, преобразователя R–F (сопротивление – частота), линии связи, преобразователя F–U (частота – напряжение) и регистратора. Структурная схема системы изображена на рис. 1.

Рабочее тело калориметра – терморезистор [1], установленный в специализированный корпус и на-

ходящийся в зоне ионизирующего излучения. Калориметр с помощью двух триаксиальных кабелей подключен к преобразователю R–F. Величина сопротивления терморезистора, включенного во времязадающую цепь преобразователя, определяет его выходную частоту.

Для частотного преобразования существует множество схем генераторов, основанных на логических элементах с времязадающей RC-цепочкой. Классически, такие генераторы строятся на логических элементах И-НЕ, ИЛИ-НЕ и др. Проведя теоретический анализ и экспериментальную выборку существующих схем генераторов по критерию большей стабильностью генерируемой частоты, выбран генератор с времязадающей RC-цепочкой на базе элементов 2И-НЕ структурная схема которого изображена на рис. 2.

Условия, в которых работают подобные системы на моделирующих установках, накладывают свои ограничения на разработчиков. Одним из важнейших условий – гальваническая развязка для предотвращения выхода из строя дорогостоящего оборудования в случае появления высоковольтной помехи. Для удовлетворения данного требования преобразователи R–F и F–U соединены оптоволоконным кабелем.

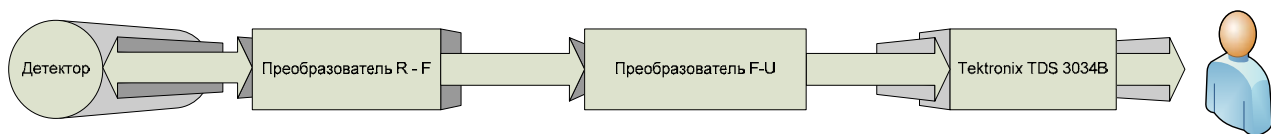


Рис. 1. Структурная схема системы

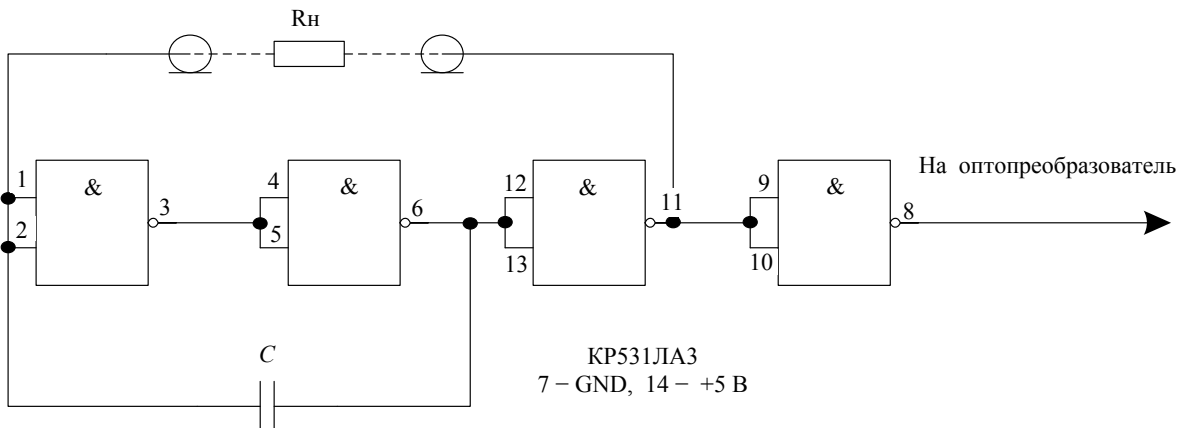


Рис. 2. Преобразователь «температура – электрический сигнал», R<sub>n</sub> – терморезистор

После информационного поиска разработчиком была предпринята попытка использовать в качестве преобразователя F–U, широко используемый в автомобильной промышленности микросхему LM2917. Схема включения микросхемы LM2917 представлена на рис. 3.

Серия испытаний системы измерения температуры рабочего тела калориметра, выявила следующую закономерность: с увеличением частоты работы преобразователя «температура – электрический сигнал» увеличивается и чувствительность всей системы. У микросхемы LM2917 максимальная частота преобразования 500 кГц, что не согласовывается с выходными параметрами датчика. В связи с этим, было принято решение на создание собственного преобразователя F–U на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Структурная схема опытного образца преобразователя F–U на базе ПЛИС представлена на рис. 4.

Опико-электрический преобразователь HFBR-2412 фирмы Avago Technologies выполняет преобразование вида измеряемого сигнала из оптической в электрическую форму. В качестве опорной частоты ПЛИС используется прецизионный тактовый генератор частотой 100 МГц с нестабильностью 5,0E-8. В данной разработке использовались ПЛИС фирмы Altera [2] серии MAX7000S. Структурная схема прошивки ПЛИС представлена на рис. 5.

В основе схемы прошивки ПЛИС лежат два четырнадцатиразрядных параллельных двоичных счетчика. Селектор разбивает поступающие импульсы измеряемой частоты на нечетные и четные, т. к. измеряемые импульсы имеют динамически меняющуюся скважность, а также генерирует сигналы, разрешающие счет длительностью от фронта нечетного до фронта четного и от фронта четного до фронта нечетного импульса для первого и второго счетчиков соответственно. В зависимости от разрешающего

сигнала, в один и тот же момент времени работа разрешена только одному из счетчиков, который осуществляет подсчет импульсов заранее известной опорной частоты, поступающих с блока управления частотой (БУЧ). Результаты работы счетчиков мультиплексируются на одну четырнадцатиразрядную шину для дальнейшего анализа и вывода информации. Схема оценки состояния производит сравнение результата с числами 0h и 3FFFh и генерирует сигнал для БУЧ: при совпадении результата с первым числом – сигнал на повышение частоты, со вторым числом – сигнал на понижение частоты. Также при совпадении результата с этими числами блокируется вывод информации, сбрасывается состояние счетчиков, и подсчет импульсов опорной частоты начинается с фронта следующего измеряемого импульса. В случае, если результат находится в диапазоне от 0h и до 3FFFh, число записывается в выходной регистр и генерируются управляющие сигналы соответствующим блоком для записи в ЦАП. Генерация управляющих сигналов производится при помощи блока формирования импульсов (БФИ). Синтез БФИ произведен по методу аналогичному [3].

Для увеличения чувствительности системы в качестве основного счетчика используется счетчик фронт/спад, структурная схема которого представлена на рис. 6. В результате этого частота дискретизации увеличивается в два раза. Счетчик фронт/спад состоит из: двух счетчиков, шинного мультиплексора и блока управления. Один из счетчиков считает поступающие импульсы опорной частоты по фронту и принимает четные значения, другой – по спаду и принимает нечетные значения. Шинный мультиплексор поочередно мультиплексирует значения счетчиков, в результате чего происходит счет в нормальной последовательности. Блок управления регламентирует работу счетчиков и мультиплексора, а также имеет выход, сообщающий о переполнении счетчиков.

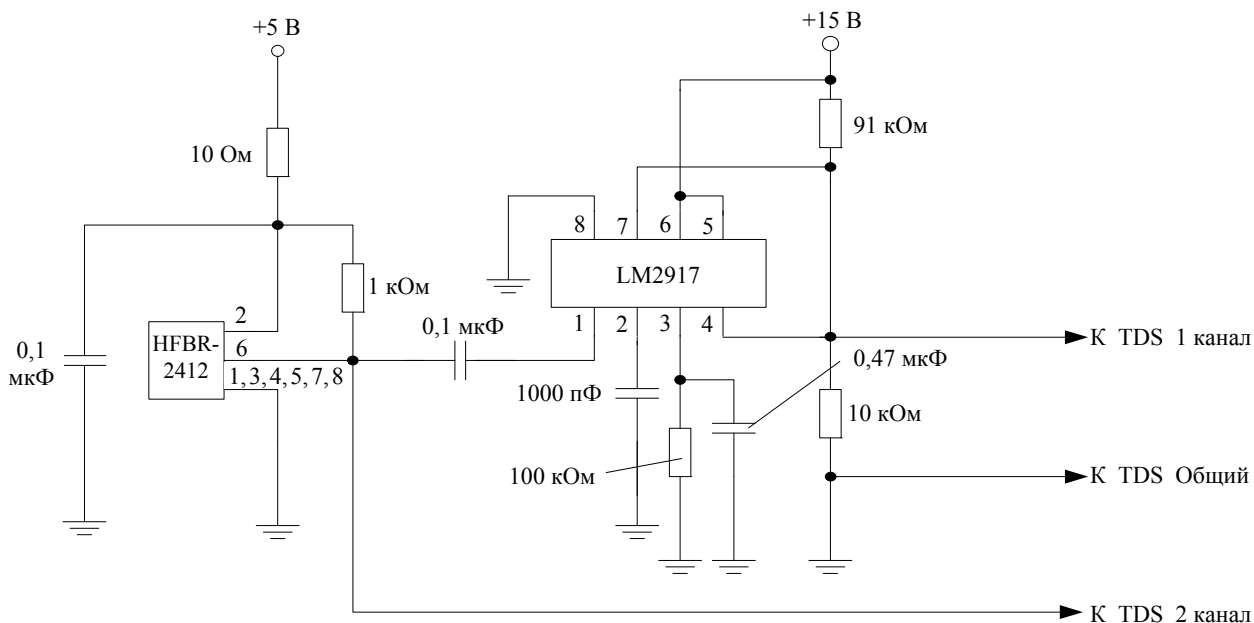


Рис. 3. Схема включения LM2917 в качестве преобразователя F–U

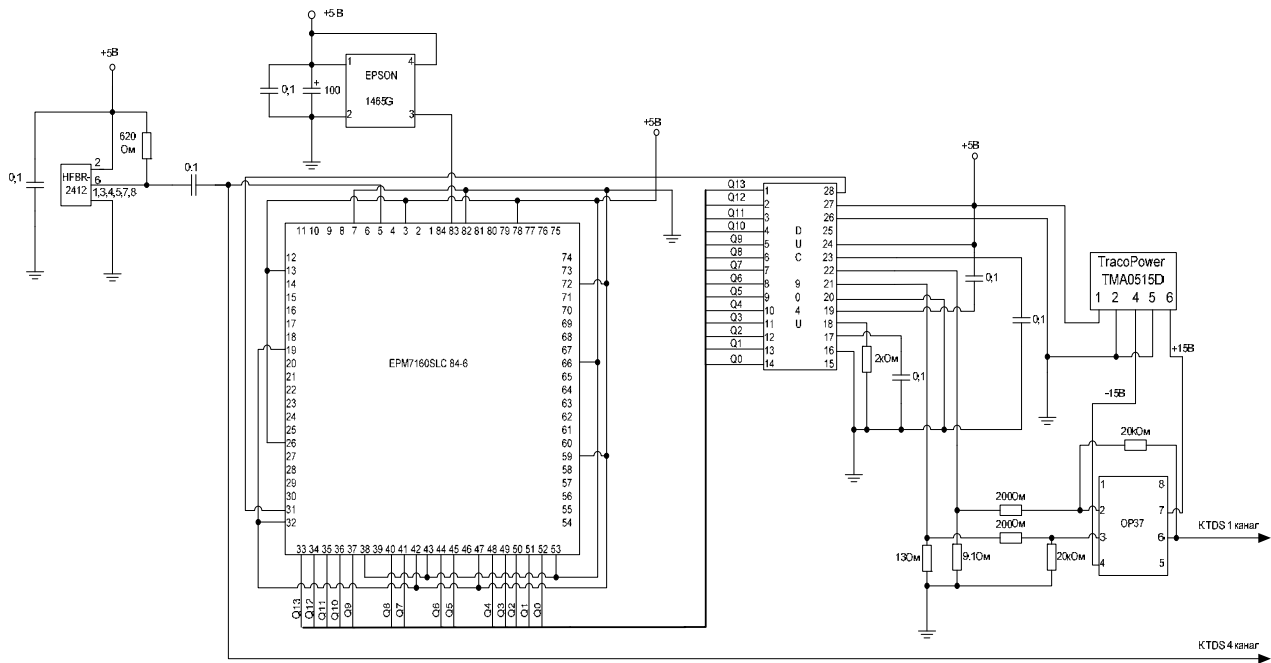


Рис. 4. Структурная схема преобразователя F-U на базе ПЛИС

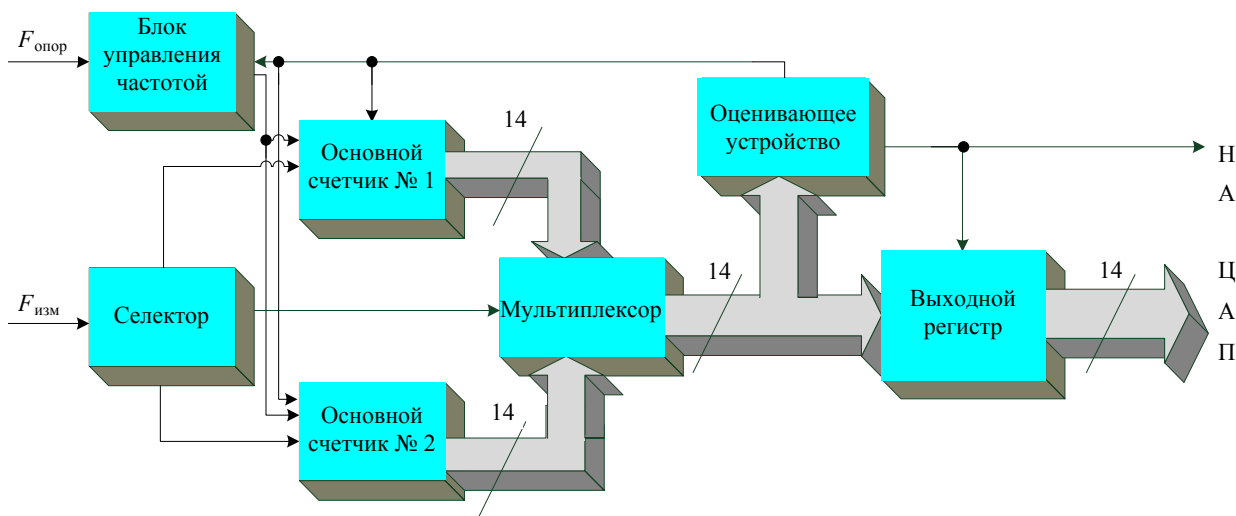


Рис. 5. Структурная схема прошивки ПЛИС

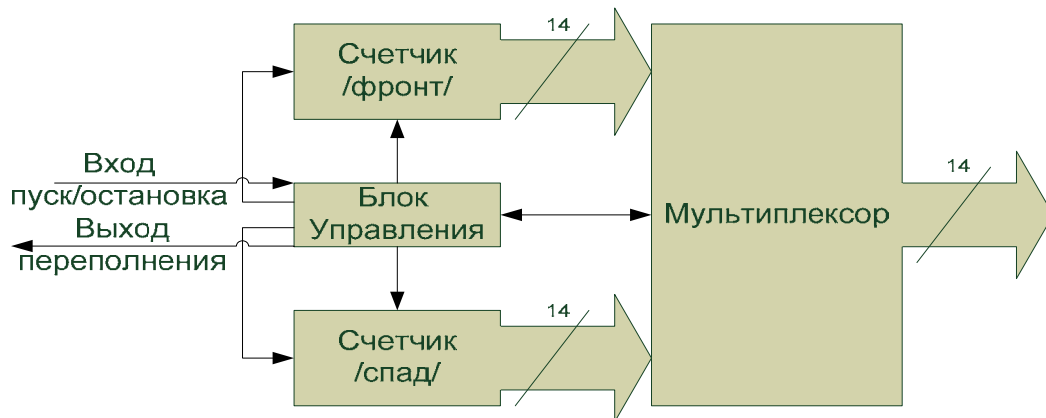


Рис. 6. Структурная схема счетчика фронт/спад

Диапазон измеряемых частот ПЧН зависит от выходной частоты БУЧ. Структурная схема БУЧ представлена на рис. 7.

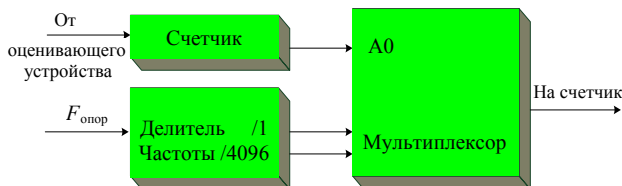


Рис. 7. Структурная схема БУЧ с двумя пределами

Выходом блока является выход мультиплексора. К адресному входу мультиплексора подключен дешифратор. С помощью дешифратора результат схемы оценки состояния преобразуется в понятный для мультиплексора вид. К информационным входам мультиплексора подключен делитель опорной частоты. Переключение с одной опорной частоты на другую происходит при разных значениях измеряемой частоты.

В аналоговой части используется четырнадцатиразрядный ЦАП DAC904 [4] фирмы Burr-Brown от Texas Instruments со скоростью преобразования 165 MSPS. Для большей наглядности к токовому выходу ЦАП подключен операционного усилителя ОР37 с напряжением питания от  $-15$  до  $+15$  В усиливающий выходной сигнал в 100 раз. В качестве

регистратора для измерения параметров аналогового сигнала с большей наглядностью используется широко распространенный осциллограф TDS3034B фирмы Tektronix.

В настоящее время проводятся испытания электронной системы быстрого измерения температуры рабочего тела калориметра на установках подразделения ИЯРФ с целью подтверждения заложенных и выявления критических параметров системы при рабочих включениях ускорителя. После каждого включения проводится сравнительная оценка с показаниями ИКС.

## Литература

1. Аксенов А. И., Нефедов А. В. Резисторы. Конденсаторы: Справочное пособие. М.: «СОЛОН-Р», 2000.
2. Стешенко В. Б. ПЛИС фирмы «Altera»: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. М.: Изд. дом «Додека – XXI», 2002.
3. Цыганков Б. В. Метод формирования управляющих сигналов для микросхемы UT621024-35 // «Молодежь в науке». Сб. докл. VI научно-технической конференции. г. Саров, 30 октября – 01 ноября 2007. Саров: ФГПУ «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
4. Data Sheet DAC 904u SBAS095B – Texas Instruments, 2002.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА В МЕТАЛЛАХ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

*М. А. Пухов, В. А. Пушков, А. В. Юрлов, А. М. Подурец*

НИЯУ МИФИ СарФТИ, г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время, в связи с ростом производства и возрастанием потребностей человека происходит рост потребляемой энергии. Однако путь эксплуатации природных источников энергии неэкологичен. Перспективным являются поиски новых источников энергии. К ним в первую очередь относится ядерная энергетика. Основополагающим фактором использования ядерной энергии является высокая надежность ядерных реакторов, которая обеспечивается применением в конструкциях АЭС материалов, обладающих высокими характеристиками как по механическим свойствам, так и по радиационной стойкости. Внедрение в современную технику материалов нового поколения – наноматериалов и композитов является одним из перспективных направлений, однако свойства наноматериалов на сегодня изучены недостаточно.

Целью данной работы является исследование локализации адиабатического сдвига как одного из режимов разрушения материалов при динамическом нагружении, которая изучается более 50 лет [1].

Актуальность изучения локализованного сдвига обусловлена тем, что имеющимися теоретическими подходами данный вид деформации описывается недостаточно полно. Основным механизмом этого процесса считается быстрый локальный цикл, состоящий из пластического деформирования материала, перехода работы в теплоту и теплового разупрочнения материала [2]. Изучение локализованного сдвига в меди, сталях, титановых сплавах и т. д. выполнялось разными исследователями с вариацией скорости и длительности нагружения. Было установлено, что образование центров локализации деформации очень чувствительно к начальной плотности дефектов и строению микроструктуры, а развитие полос сдвига зависит от истории и пути деформирования, а также от начального распределения дефектов в материалах [3]. Изучение сложного процесса локализации сдвига сопровождалось в некоторых работах расчетной оценкой температуры в полосе сдвига [3, 4]. Например, для отожженной и предварительно деформированной стали 304 расчетная температура в полосе сдвига составила 1500–3100 К [3], что превышает температуру плавления. В то же время с помощью просвечивающей электронной микроскопии следов плавления обнаружено не было [5].

В целом же исследователи признают, что, несмотря на большой объем полученных данных, развитие локализованного сдвига в материалах изучено недостаточно. Данные исследования необходимы для изучения локализованного сдвига как одного из видов гетерогенной деформации материалов, а также для связи его с параметрами нагружения и микроструктуры с целью построения более физически обоснованных моделей динамического деформирования и разрушения металлов.

Применение моделей на стадии проектирования резко снижает риск аварийного разрушения трубопроводов и возникновения масштабных экологических последствий.

## Методика исследований

В процессе разработки методики были проведены эксперименты на шляповидных образцах [6] с заранее определенным направлением вынужденного сдвига (см. рис. 1). Размеры образцов подбирались тщательным образом с целью минимизации пластического деформирования в центральной области и в основании образца. Преимущество такой геометрии образца состоит в том, что она способствует образованию полос сдвига вследствие частичного сдерживания образования пустот за счет напряжения сжатия при сдвиге. С другой стороны, недостатком такой конструкции является невозможность точного измерения деформации сдвига и эффекта расширения цилиндрического основания в процессе образования сдвига. При возникновении сдвиговой текучести в сечении сдвига нормальное напряжение на шляповидной части и кольцевом основании образца должно быть существенно ниже предела текучести материала образца. По схеме, представленной на рис. 1, проводились исследования вынужденного сдвига с помощью метода ССГ, когда образцы, с габаритными размерами  $\varnothing 10 \times 5$  мм, помещались между торцами мерных стержней.

Импульсная нагрузка в нагружающем стержне создавалась ударниками из стали ХВГ (диаметром 20 мм, длиной 300–420 мм), разгоняемыми с помощью пневматической пушки до скоростей от 4 до 8 м/с. В опытах регистрировались скорость ударника и напряжения (деформация) в нагружающем и опорном стержнях. По импульсам определялось смещение торцов образца относительно друг друга и напряжение сдвига в образце.

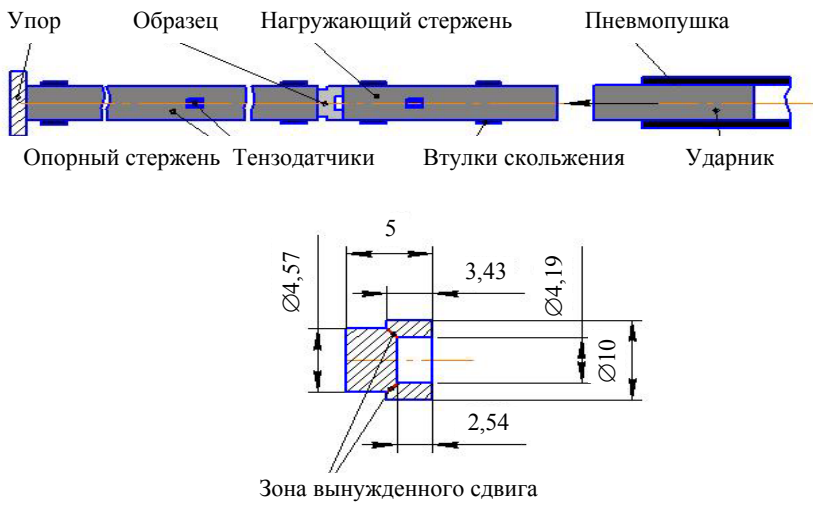


Рис. 1. Схема проведения испытаний и размеры образца на локализованный сдвиг методом ССГ

На рис. 2 представлена схема регистрируемых в опытах упругих импульсов деформации в падающей ( $\epsilon_i$ ), отраженной ( $\epsilon_r$ ) и проходящей ( $\epsilon_t$ ) волнах напряжения. В сечении локализованного сдвига, обозначенном схематически на рис. 2, действует нормальное напряжение определенной величины, а также напряжение сдвига.

Расчет истинного напряжения сдвига основывается на предположении, что сила сдвига действует только в сдвиговом сечении между двумя краями образца (сечение АВ на рис. 3). Схема определения сдвиговой компоненты нагружения показана на рис. 3, где  $P_s$  и  $P_n$  сдвиговая и сжимающая компоненты нагружения без учета эффекта расширения цилиндрического основания.

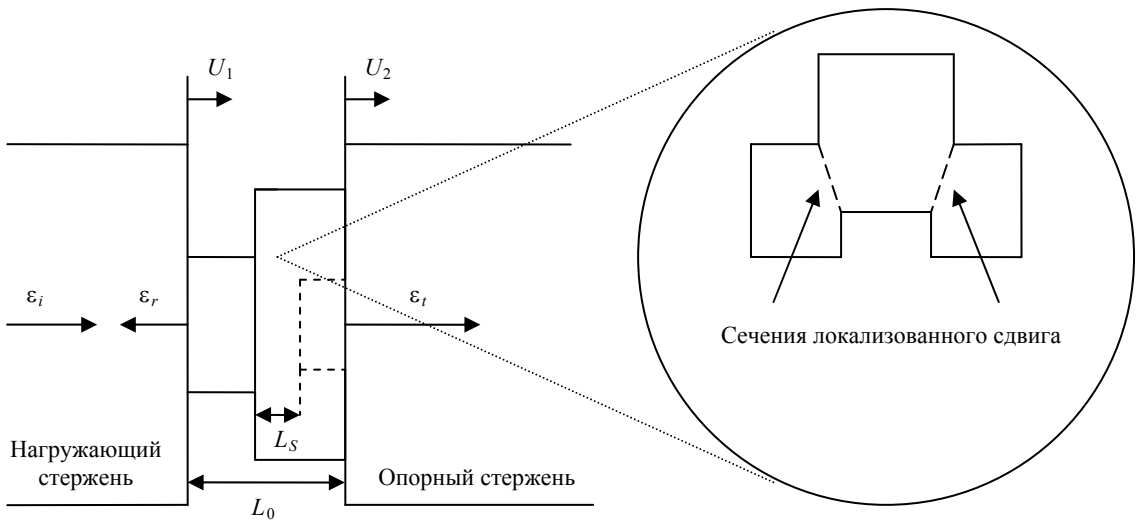


Рис. 2. Схематическое изображение образца, мерных стержней с регистрируемыми импульсами упругой деформации и локализованного сдвига:  $L_0$  – номинальная длина образца;  $L_S$  – длина сдвигового сечения;  $U_1$  и  $U_2$  представляют собой смещение обоих краев образца

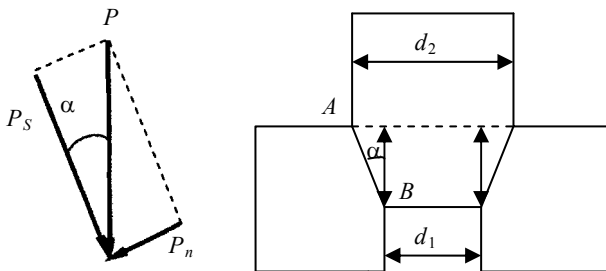


Рис. 3. Схема определения сдвиговой компоненты нагружения без учета эффекта расширения при величине угла  $\alpha$

Угол  $\alpha$  в проведенных опытах составляет  $12^\circ$ . Напряжение сдвига рассчитывается по следующим формулам:

$$\sigma_S = P_S / S;$$

$$P_S = P \cos(\alpha);$$

$$S = \pi \left( \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} \right) \sqrt{h^2 + \left( \frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2} \right)^2},$$

где  $S$  – рабочая площадь образца;  $P_S$  – сдвиговая компонента нагружения.

Адиабатический локализованный сдвиг был достигнут в малогабаритных образцах при скоростях нагружения порядка 4,5–7,7 м/с.

## Результаты исследований

Нагружение образцов меди проводилось ударниками длиной 420 и 300 мм, разгоняемыми со скоростями 4,5; 5,3 м/с. Длительность нагружающих импульсов в данных опытах составила  $t_1 = 168$  мкс и  $t_2 = 120$  мкс, а амплитуды нагружающих импульсов  $A_1 = 400$  МПа,  $A_2 = 400$  МПа. Смещение образцов, измеренное после проведения опытов, составило 1,7 и 2,6 мм соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости напряжения сдвига от смещения для меди М1.

Из рис. 4 видно, что зависимости «напряжение сдвига – смещение» имеют характерный вид с ярко выраженной точкой максимального напряжения сдвига  $\sigma_S = 325$  МПа, после которого наблюдается спад. Такая реакция отражает состояние насыщения способности к деформационному упрочнению и указывает на точку, начиная с которой при дальнейшем деформировании образца начинают преобладать процессы разупрочнения. С точки зрения критерия максимального напряжения для возникновения неустойчивости, широко используемого при анализе адиабатического сдвига, максимум напряжения сдвига обычно рассматривается как точка начала неустойчивости, после которой деформирование материала

начинает локализовываться в виде полосы сдвига. Образование полос сдвига в этих опытах подтверждается и при исследовании микроструктуры испытанных образцов. Для иллюстрации на рис. 5 показан разрезанный образец, на котором видна локализованная зона сдвиговой деформации.

На рис. 6 представлена микроструктура зон сдвига, которые образовались в проведенных опытах. В этих зонах наблюдается локализованная полоса сдвига.

Нагружение образцов стали 09Г2С проводилось ударником длиной 420 мм, разгоняемым со скоростями 4,5 и 7,7 м/с. Длительности импульсов нагружения для опытов со сталью равны  $t_1 = t_2 = 168$  мкс. Амплитуды нагружающих импульсов  $A_1 = 877$  МПа,  $A_2 = 850$  МПа. Величина смещения (укорочения) образцов, измеренная после опытов, составила  $\Delta = 0,7$  и 1,6 мм, соответственно.

На рис. 7 представлены полученные в экспериментах зависимости напряжения сдвига от смещения для стали 09Г2С.

Зависимости для стали 09Г2С, также как и для меди, имеют характерный вид с ярко выраженной точкой максимального напряжения сдвига, для стали равным  $\sigma_S = 700$  МПа, после которого начинается спад кривой. Как указывалось выше, такой вид кривых характерен при образовании локализованных полос сдвига. Для подтверждения этого проводилось исследование микроструктуры данных образцов.

На рис. 8 представлена микроструктура зоны сдвига для стали 09Г2С.

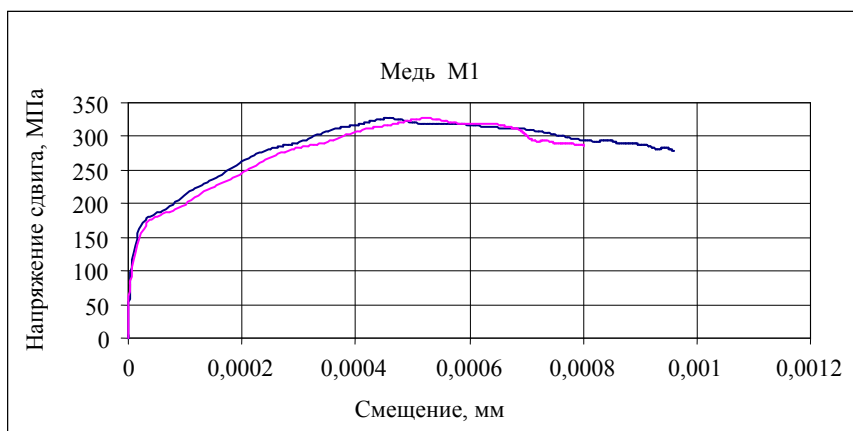


Рис. 4. Изменение напряжения сдвига в зависимости от смещения для меди М1

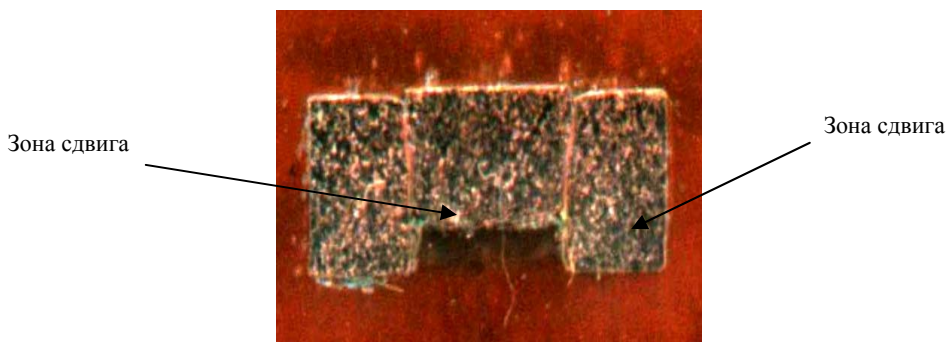


Рис. 5. Микроструктура медного образца, испытанного на локализованный сдвиг



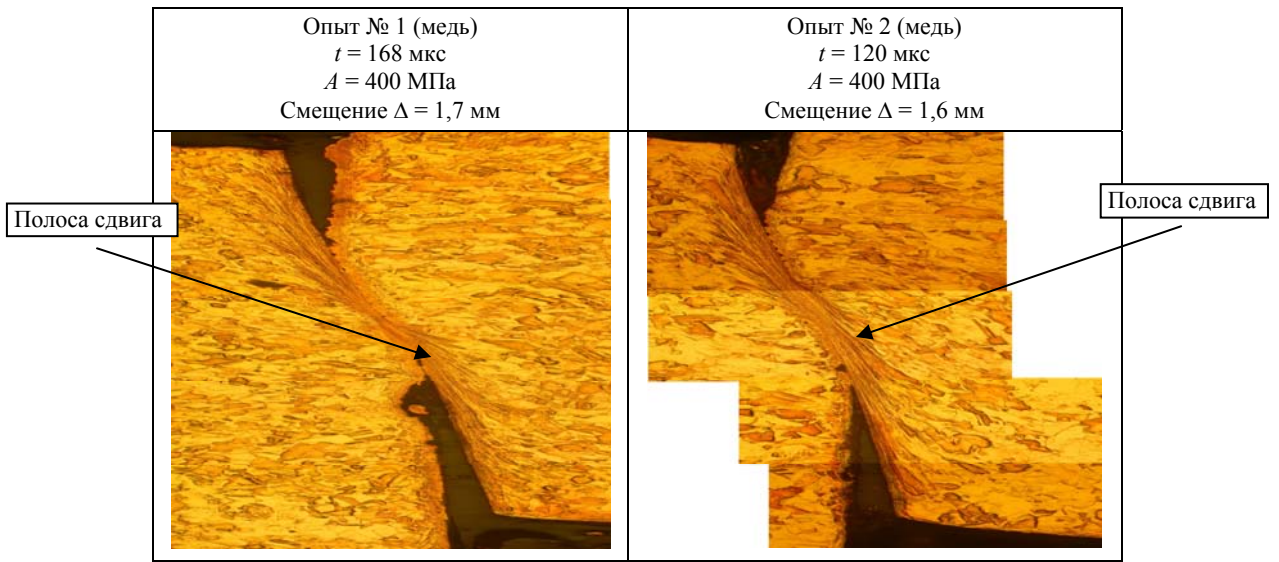


Рис. 6. Микроструктура зоны сдвига

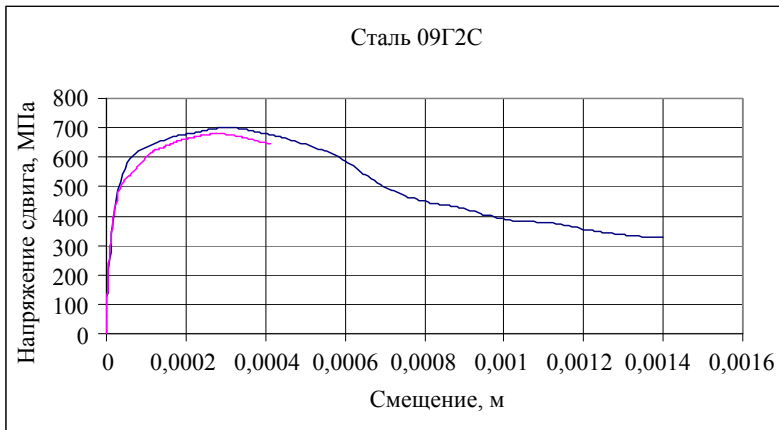


Рис. 7. Изменение напряжения сдвига в зависимости от смещения для стали 09Г2С

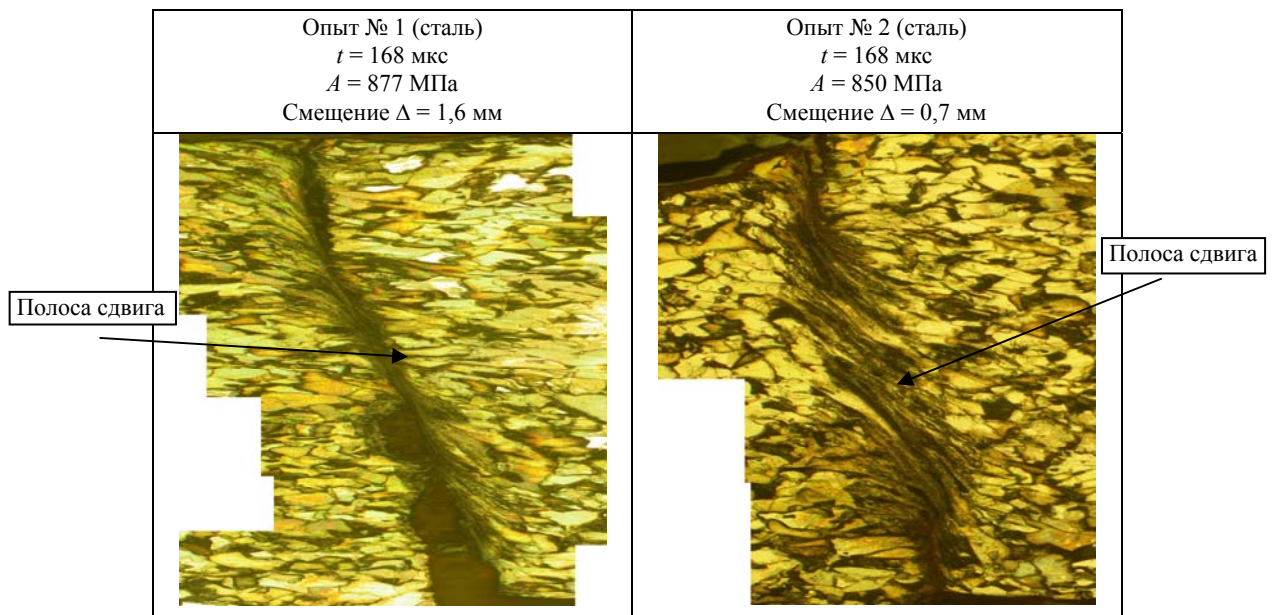


Рис. 8. Микроструктура зоны сдвига

Анализ структуры образцов стали 09Г2С (рис. 8), и сравнение кривых на рис. 7 показал, что при напряжении сдвига  $\sigma_S = 700$  МПа и длительности импульса  $t = 168$  мкс наблюдается развитая полоса сдвига, в то время как при напряжении  $\sigma_S = 678$  МПа наблюдается сильная сдвиговая деформация по всему рабочему сечению образца, предваряющая начало локализации.

### Заключение

Получены первые результаты испытаний меди М1, стали 09Г2С, построены диаграммы «напряжение сдвига – смещение» и проведен анализ результатов. В процессе исследования были определены величины амплитуд и длительностей импульсов нагружения, а так же напряжения сдвига, при которых образовывался адиабатический локализованный сдвиг в данной геометрии образцов. Для более точного определения напряжения, при котором начинается образование локализованной полосы сдвига, для определения деформации сдвига и ее скорости деформации в зоне локального сдвига необходимо провести серию экспериментов, используя импульсы нагружения различной длительности. В этих экспериментах будет фиксироваться характер развития локализации сдвига в образцах на различных стадиях (начало вынужденного сдвига и полный сдвиг).

Полученные результаты подтвердили возможность проведения подобных испытаний на образцах указанной геометрии с помощью метода ССГ и исследования на ряде материалов будут продолжены.

### Литература

1. Rogers H. C. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1979. Vol. 9. P. 283–311.
2. Bai Y., Dodd B. *Adiabatic Shear Localization*, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1992. P. 24–53.
3. Xue Q., Gray III G. T., Henrie B. L., Maloy S. A., Chen S. R. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 36A, June 2005. P. 1471–1486.
4. Xue Q., Gray III G. T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part I. Correlation between evolving microstructure and mechanical behavior, *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 37A, August 2006. P. 2435–2446.
5. Hartman K. H., Kunze H. D., Meyer L. W. in *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, M. A. Meyers and L. E. Murr, eds., Plenum Press, 1981. P. 325–337.
6. А. П. Большаков, А. М. Брагов, Н. Н. Гердюков и др. Исследование динамической прочности конструкционных материалов: Учеб. пособие / СарФТИ; Саров; Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2003.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ И ФЭУ-184

А. С. Симутин, М. Ю. Чернов, Д. С. Семенов, А. Д. Орлов\*

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

\*Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка Московской обл.

Одним из наиболее перспективных с точки зрения эффективности и энергетического разрешения является сцинтиллятор на основе бромида лантана, активированного церием. Монокристаллы сцинтиллятора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  имеют высокий световыход, составляющий  $\sim 7 \cdot 10^4$  фотонов/МэВ, плотность  $5,3 \text{ г/см}^3$  и короткое время высвечивания  $\sim 16 \text{ нс}$  [1], что делает их подходящими для использования в современных спектрометрах, в особенности, если к ним предъявляются требования по высокому быстродействию. Энергетическое разрешение кристаллов на основе галогенидов лантана, заметно лучше по сравнению с широко распространенным в настоящее время  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , позволяет использовать его при создании гамма-спектрометрической аппаратуры нового поколения.

Таблица 1

Основные характеристики сцинтилляторов

Сцинтиллятор	$\text{NaI}(\text{Tl})$ [1]	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [1]
Плотность, $\text{г/см}^3$	3,67	5,29
Световыход, $10^4$ фотон/МэВ	4	6,8
Собственное энергетическое разрешение (662 кэВ), %	5,9	2,8
Время высвечивания, нс	$\sim 200$	$\sim 16$
Максимум спектра излучения, нм	415	370
Естественная радиоактивность	нет	Распад $^{138}\text{La}$
Гигроскопичность	Есть	Есть

Чувствительным элементом разрабатываемого прибора является монокристалл бромида лантана, активированного церием, диаметром 25 мм и высотой 25 мм, помещенный в специальный герметичный корпус.

Кристалл ДССБЛ.01.25.25 (рис. 1) изготовлен в Институте физики твердого тела РАН. Кристаллы ДССБЛ.01 разработаны для применения в аппаратуре, предназначенной для регистрации и спектрометрии гамма-излучения в интервале энергий от 0,05 до 5,00 МэВ. Основным сцинтилляционным параметром кристалла ДССБЛ.01 является амплитудное разрешение в процентах по гамма-излучению  $^{137}\text{Cs}$  и световой выход в фотонах на МэВ, измеренный по фотопику для гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ , а также собственный фон [1]. Согласно паспортным данным, при-



Рис. 1. Кристалл ДССБЛ.01.25.25

меняемый в нашей разработке кристалл ДССБЛ.01.25.25 имеет световой выход не менее 45000 фотон/МэВ и амплитудное разрешение при нормальных климатических условиях, измеренные по фотопику для гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ , не более 5 %. Собственный фон кристаллов в условиях защиты в диапазоне энергий от 0,1 до 3,0 МэВ должен быть не более 100 имп/с.

Для создания спектрометра, использующего кристалл  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , был проведен ряд экспериментов по выявлению выпускаемых российской промышленностью фотоэлектронных умножителей с минимальным размером входного окна, способных реализовать спектрометрические возможности кристалла.

Рассматривались серийно выпускаемые фотоэлектронные умножители ФЭУ-85, ФЭУ-115МУ, ФЭУ-181-1 с диаметром фотокатода 25 мм и ФЭУ-184 с диаметром фотокатода 46 мм, область максимальной чувствительности которых (340–440 нм) соответствует длине волны излучения  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  370 нм.

Исследованиям подвергались сцинтилляционные сборки, состоящие из кристалла ДССБЛ.01.25.25 и фотоумножителя ФЭУ-85, ФЭУ-115МУ, ФЭУ-181-1 и ФЭУ-184 с соответствующими высоковольтными делителями. Исследование проводилось с целью определения разрешающей способности сборки монокристалл-ФЭУ-делитель для линии 662 кэВ источника  $^{137}\text{Cs}$  при условии соблюдения линейности отклика сцинтилляционной сборки. Линейность отклика проверялась по отношению амплитуд сигналов, соответ-

ствующих линиям 898 и 1836 кэВ источника  $^{88}\text{Y}$ , при различных напряжениях питания ФЭУ. При исследованиях использовались образцовые спектрометрические источники фотонного излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{88}\text{Y}$ .

Спектры регистрировались амплитудным анализатором Canberra Series 35 Plus, также использовались зарядочувствительный усилитель, усилитель сигналов Canberra AFT Research Amplifier Model 2025, осциллограф Tektronix TDS 3032, высоковольтный источник СБПК55 и низковольтный источник Б5-7 (схема эксперимента приведена на рис. 2).

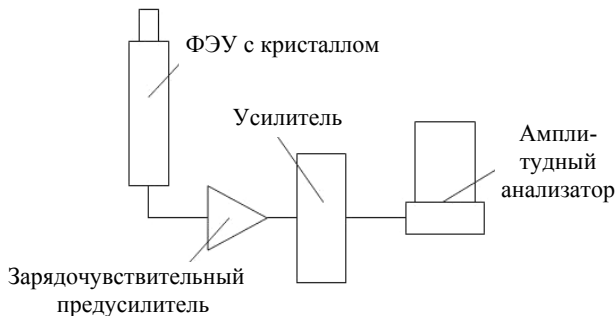


Рис. 2. Схема эксперимента

Сцинтилляционный кристалл приклеивался к входному окну каждого образца ФЭУ оптическим вазелином. На ФЭУ подавалось высокое напряжение отрицательной полярности. Сигнал снимался с анода фотоумножителя и через зарядочувствительный усилитель сигналов подавался на амплитудный анализатор. Время экспозиции для всех измерений было выбрано равным 300 с. Источник гамма-излучения располагался на расстоянии 5 см от входного окна кристалла. Для каждого образца ФЭУ подбиралось оптимальное напряжение питания. Критерием оптимальности служило наилучшее значение энергетического разрешения при условии соблюдения линейности сигнала со сцинтилляционной сборки. Соблюдение линейности функции отклика сцинтилляционной сборки проверялось путем сравнения отношения номеров каналов, в которых располагались максимумы пиков зарегистрированного спектра  $^{88}\text{Y}$ , со значениями

ем 2,04, равным отношению энергий гамма-линий  $^{88}\text{Y}$  898 и 1836 кэВ (рис. 7). Для каждого значения напряжения питания ФЭУ также определялось амплитудное разрешение по линии 662 кэВ гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$ . Таким образом, были определены характеристики сцинтилляционной сборки кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  с каждым образцом ФЭУ при оптимальном значении напряжения питания.

В результате исследований было установлено, что амплитудное разрешение по линии 662 кэВ для ФЭУ-85, ФЭУ-115МУ и ФЭУ-181-1 с диаметром фотокатода 25 мм составляло от 4,5 до 5,0 % (соответствующий спектр приведен на рис. 3).

Несколько лучшие результаты были получены для ФЭУ-184 с диаметром фотокатода 46 мм, включенного в схему со стандартным делителем напряжения ( $R_1 = 4R$ ;  $R_2 = R_5 = 1,3R$ ;  $R_3 = 1,5R$ ;  $R_4 = R_6 = R_7 = \dots = R_{11} = R$ ) (схема представлена на рис. 4) и отрицательным питанием, в этом случае амплитудное разрешение составляло 4,3–4,4 %.

С увеличением напряжения питания ФЭУ амплитудное разрешение улучшалось, но при этом нарушалась линейность из-за перегрузки зарядочувствительного усилителя. Схема включения ФЭУ была изменена: на ФЭУ было подано положительное напряжение питания, и, чтобы избежать перегрузки

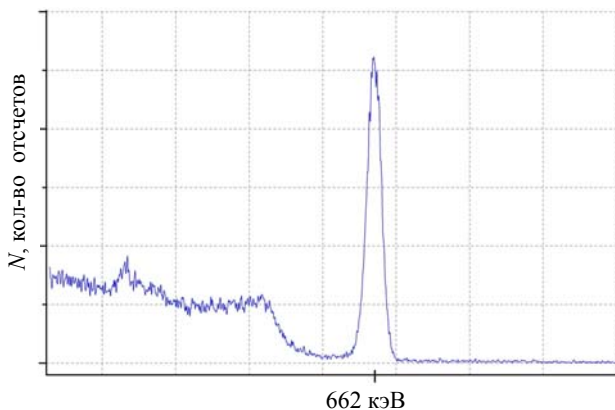


Рис. 3. Участок спектра источника  $^{137}\text{Cs}$  с разрешением 4,6 %

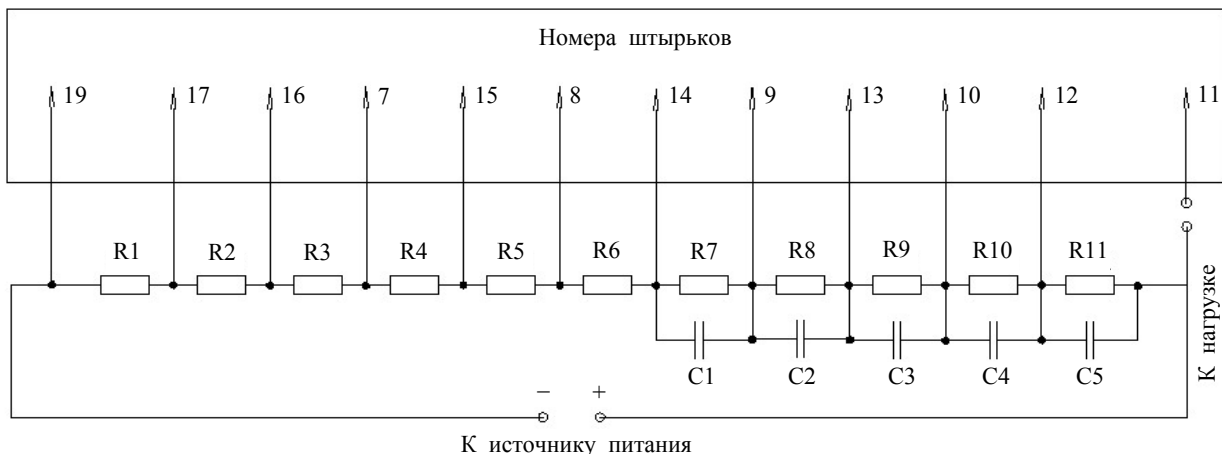


Рис. 4. Стандартная схема включения ФЭУ-184

усилителя, съем сигнала стал производиться с предпоследнего динода. В результате амплитудное разрешение улучшилось до величин 3,8–4,0 %. Чтобы оптимизировать распределение высоковольтных потенциалов между динодами ФЭУ при такой схеме включения, параметры делителя напряжения были изменены следующим образом:  $R_1 = R$ ;  $R_2 = \dots = R_{11} = 0,47R$ .

При такой схеме питания ФЭУ (рис. 5) было получено разрешение 3,2 % (соответствующий амплитудный спектр приведен на рис. 6).

Следует отметить, что из имеющихся в наличии десяти штук ФЭУ-184 только четыре экземпляра показывали разрешение для линии 662 кэВ в пределах 3,2–3,3 %, сохраняя линейность отклика при изменении высокого напряжения в пределах 100 В в диапазоне от 570 до 660 В (график зависимости линейности и разрешения от величины напряжения представлен на рис. 7).

Выбор фотоэлектронного умножителя с наилучшими спектрометрическими характеристиками и оптимизации схемы его питания для работы с монокристаллом  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  позволил создать сцинтилляционный спектрометрический детектор, имеющий

энергетическое разрешение 3,2 % по линии 662 кэВ  $^{137}\text{Cs}$ , близкое к значению 2,9 % у детектора BrillanCe380 компании Saint-Gobain [3].

В то же время, для создания полноценного спектрометрического тракта необходимы и другие технические характеристики – зависимость энергетического разрешения от энергии, интегральная нелинейность, температурная зависимость и т. д.

Используя ранее полученные параметры ФЭУ и делителя, были проведены исследования характеристик детектора гамма-излучения на основе монокристалла бромид лантана. Исследованиям подвергалась сцинтилляционная сборка, состоящая из кристалла ДССБЛ.01.25.25 и фотоумножителя ФЭУ-184 с высоковольтным делителем. Спектры регистрировались при помощи ЭВМ и программы АСР, предназначенной для управления набором амплитудных спектров производства ООО «Парсек», также использовались высокоскоростной спектрометрический амплитудноцифровой преобразователь (В4к-САЦП-USB), усилитель сигналов Canberra AFT Research Amplifier Model 2025, осциллограф Tektronix TDS 3032 и высоковольтный источник СБПК55 (см. рис. 8).

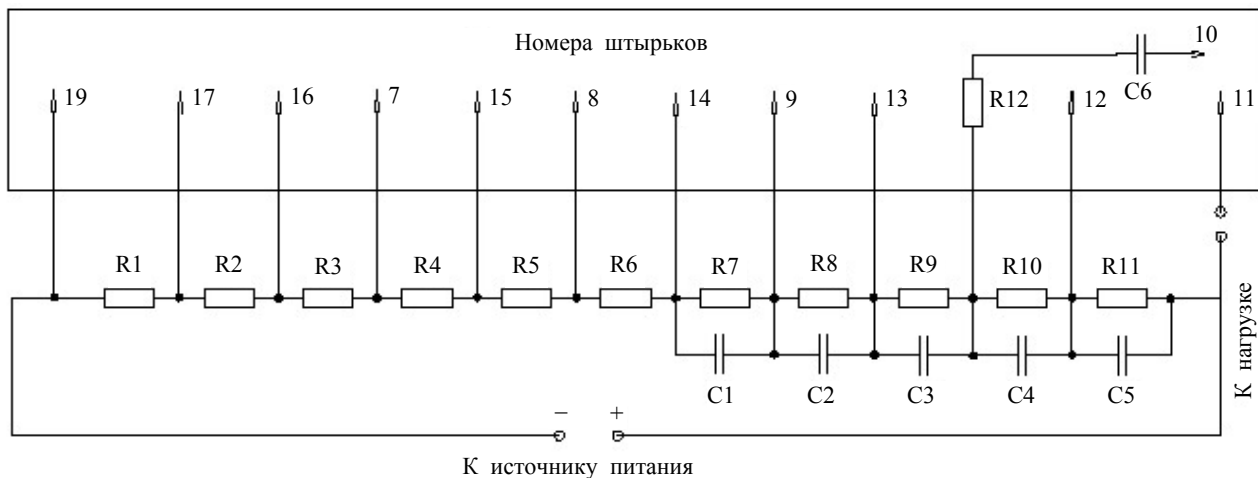


Рис. 5. Оптимизированная схема включения ФЭУ-184

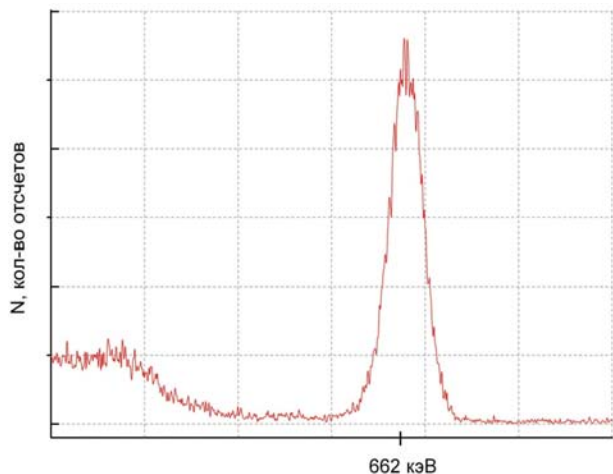


Рис. 6. Участок спектра источника  $^{137}\text{Cs}$  с разрешением 3,2 %

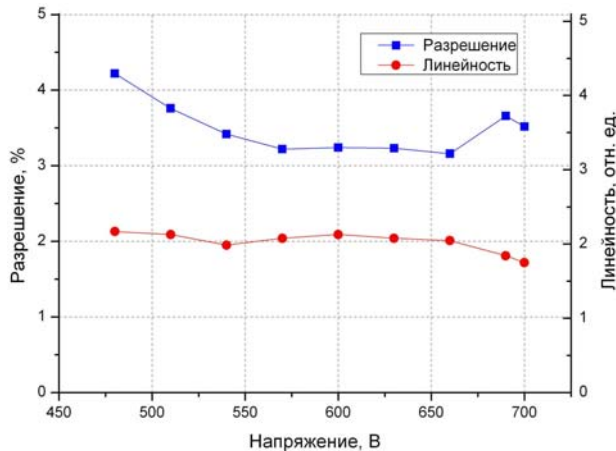


Рис. 7. График зависимости линейности и разрешения от величины напряжения



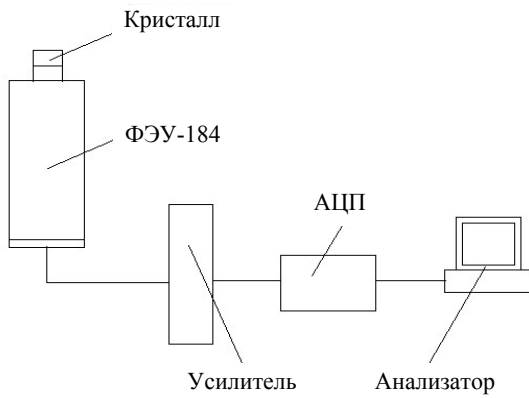


Рис. 8. Схема эксперимента

Сцинтилляционный кристалл приклеивался к входному окну ФЭУ оптическим вазелином. На ФЭУ подавалось положительное напряжение питания, сигнал снимался с предпоследнего диода, и через усилитель подавался на амплитудный анализатор. Время экспозиции для всех измерений было выбрано равным 600 с. Источник гамма-излучения располагался на расстоянии 5 см от входного окна кристалла.

Ниже приводятся результаты исследования характеристик детектора гамма-излучения на основе монокристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и ФЭУ-184.

### Зависимость энергетического разрешения от энергии для $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$

Таблица 2

Зависимость энергетического разрешения от энергии нуклида

Нуклид	Энергия, кэВ	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Разрешение, %	$\text{NaI}(\text{Tl})$ Разрешение, %	Коэффициент улучшения
$^{241}\text{Am}$	59,537	13,6	14,6	1,1
$^{139}\text{Ce}$	165,857	6,5	11,0	1,7
$^{133}\text{Ba}$	356,017	4,2	8,1	1,9
$^{113}\text{Sn}$	391,702	3,9	7,7	2,0
$^{137}\text{Cs}$	661,660	3,2	6,9	2,2
$^{54}\text{Mn}$	834,843	2,6	6,8	2,6
$^{60}\text{Co}$	1173,238 1332,502	2,4 2,3	6,4 5,8	2,7 2,5
$^{88}\text{Y}$	1836,063	2,0	4,3	2,2

Для области энергий выше 100 кэВ бромид лантана имеет преимущество по разрешению над кристаллом  $\text{NaI}(\text{Tl})$  от 1,7 до 2,7 раз.

Для проверки энергетического диапазона и линейности для каждого источника из набора ОСГИ определялся номер канала, в котором располагалась вершина пика, соответствующего энергии излучения источника и затем эти данные наносились на график, где по оси  $X$  отложена энергия соответствующего радионуклида, а по оси  $Y$  – номер канала. Полученный график представлен на рис. 9.

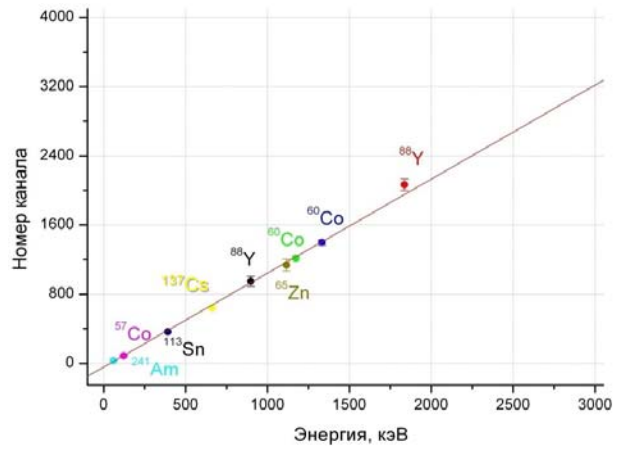


Рис. 9. График зависимости энергии радионуклида от номера канала

Из графика видно, что бромид лантана обладает хорошей линейностью в диапазоне от 50 кэВ до 2 МэВ. В линейном режиме график зависимости энергетического разрешения от энергии имеет следующий вид (см. рис. 10).

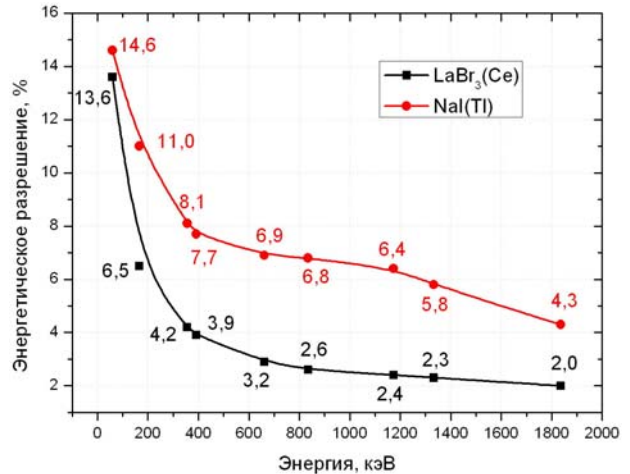


Рис. 10. График зависимости энергетического разрешения от энергии нуклида

### Характерный собственный фон

Собственный фон кристаллов бромида лантана в основном формируется за счет распада радионуклида  $^{138}\text{La}$ , который присутствует в природной смеси изотопов лантана около 0,09%.  $^{138}\text{La}$  распадается (схема представлена на рис. 11) путем электронного захвата (66,4%) в  $^{138}\text{Ba}$  и путем бета-распада (33,6%) в  $^{138}\text{Ce}$ . Электронный распад сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергией 1436 кэВ и рентгеновского излучения,  $\beta$ -распад с граничной энергией 252 кэВ сопровождается гамма-излучением с энергией 789 кэВ.

Пик с энергией  $\sim 1,45$  МэВ (см. рис. 12), помимо  $\gamma$ -квантов с энергией 1,436 МэВ, формируют  $\gamma$ -кванты внешнего фона с энергией 1,461 МэВ, возникающие при распаде радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ , который содержится во многих материалах, в частности в стекле входного окна ФЭУ.

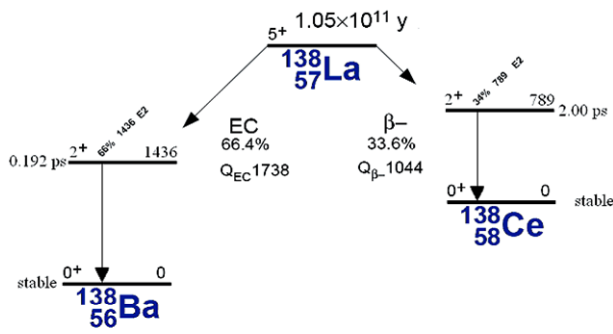


Рис. 11. Схема распада  $^{138}\text{La}$

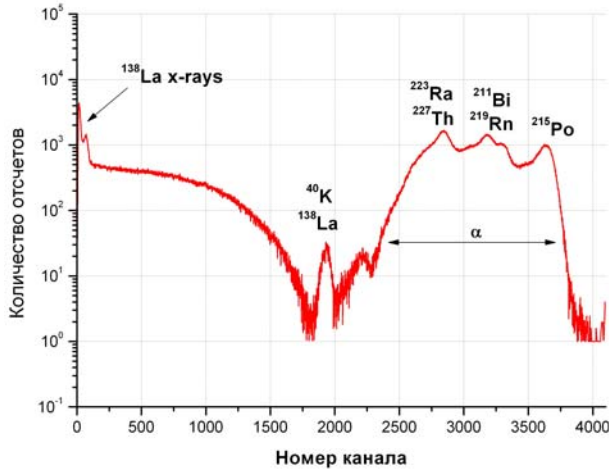


Рис. 12. Спектр фона сцинтиллятора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

При энергиях выше 1,55 МэВ, как видно из рис. 12, наблюдается широкое плато в измеряемом фоне, которое обусловлено серией  $\alpha$ -распадов, порождаемых радиоактивным изотопом  $^{227}\text{Ac}$ .

Примесь этого изотопа неизбежно присутствует в исходном материале, из которого выращивается кристалл  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  [1].

### Сравнение спектров кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$

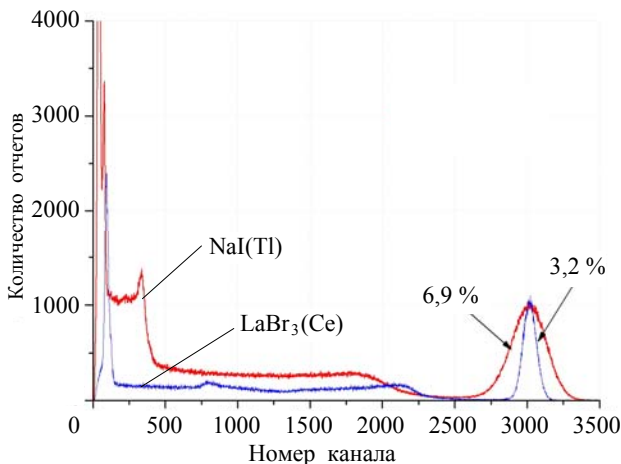


Рис. 13. Спектры  $^{137}\text{Cs}$

Как видно из сравниваемых спектров, бромид лантана обладает существенно более высоким, по сравнению с кристаллом  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , энергетическим разрешением. Значение разрешения для  $\text{NaI}(\text{Tl})$  составляет 6,9 %, в то время как для  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  типовое значение разрешения составляет лишь 3,2 %. С увеличением энергии характеристики  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , по сравнению с  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , становятся еще лучше. В диапазоне энергий от 200 до 400 кэВ, особенно важном для большинства приложений, бромид лантана обеспечивает существенные преимущества в отношении идентификации радионуклидов. Это видно из следующего рис. 14, где показан спектр изотопа  $^{133}\text{Ba}$ .

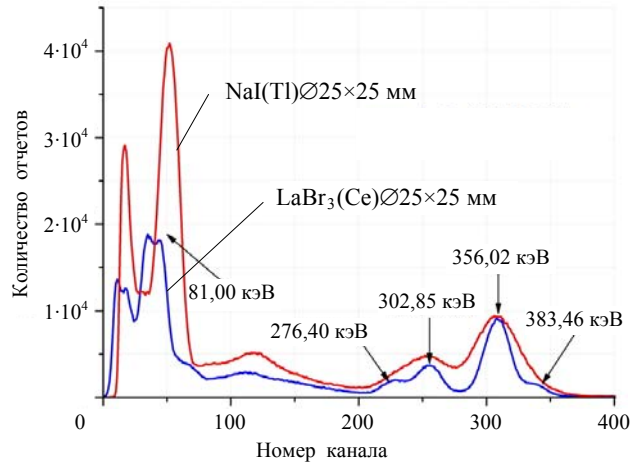


Рис. 14. Спектры  $^{133}\text{Ba}$

### Эффективность регистрации кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce}) \text{ } \varnothing 25 \times 25$ относительно $\text{NaI}(\text{Tl}) \text{ } \varnothing 25 \times 25$

Эффективность регистрации другой очень важный параметр для гамма-спектрометров. По эффективности регистрации также наблюдается существенное преимущество детектора на основе монокристалла бромида лантана. Если принять эффективность регистрации  $\text{NaI}(\text{Tl})$  за 100 %, то можно увидеть, что с ростом энергии эффективность регистрации для кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  растет (рис. 15).

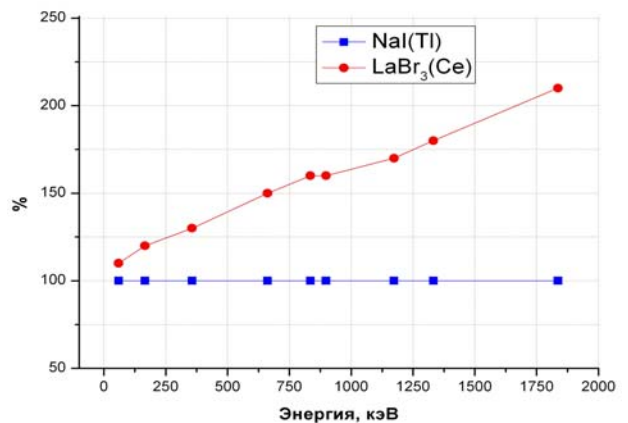


Рис. 15. Эффективность регистрации  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  относительно  $\text{NaI}(\text{Tl})$



## Климатические испытания кристалла ДССБЛ.01.25.25 и ФЭУ-184

Также были проведены климатические испытания кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и ФЭУ-184. Сборка была помещена в климатическую камеру. Кристалл охлаждался на 5 градусов в течение 90 минут, в диапазоне от  $-10$  до  $+40$  градусов Цельсия. Таким образом, была получена температурная зависимость, которая представлена на рис. 16.

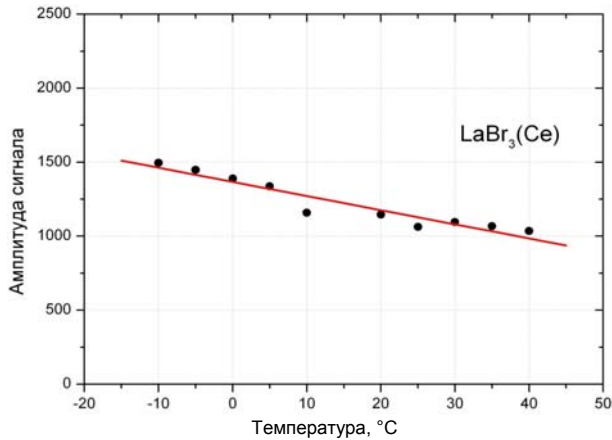


Рис. 16. График зависимости амплитуды сигнала от температуры

Полученная зависимость, в целом, находится в согласии с данными иностранных коллег [3].

И в заключении хочу отметить, что проведенные исследования показали возможность создания спектрометрического детектора на основе монокри-

стала  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и ФЭУ отечественного производства, а также то, что разрабатываемый спектрометрический детектор, сопоставим по своим характеристикам с импортными аналогами. Таким образом, использование блоков детектирования на основе кристаллов  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , позволит качественно улучшить парк приборов сцинтилляционной гамма-спектрометрии России [5].

## Литература

1. Июдин А. Ф., Богомолов В. В. и др. Особенности собственного фона в сцинтилляционных кристаллах  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и  $\text{CeBr}_3$  // Приборы и техника эксперимента. 2009, № 6. С. 16–24.
2. Симутин А. С., Чернов М. Ю. и др. Выбор фотоэлектронного умножителя для спектрометрического детектора на основе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  // Сб. докл. семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». Обнинск, 2009.
3. Shah K., Higgins W., Van Loef E. V. // High Resolution Sensor for Nuclear Waste Characterization, Report of Radiation Monitoring Devices Inc., Watertown, United States, 2005.
4. Van Loef E. V. // Halide Scintillators, Delft University of Technology, Netherlands, 2003.
5. Дорин А. Б., Ельцин В. Ф., Чураков А. К., Аналитический обзор российских гамма-спектрометров // Сб. докл. семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». Обнинск, 2009.

# АМАЛЬГАМНАЯ ЛАМПА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (185 нм)

*Д. А. Собур*

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва  
ЗАО «Лаборатория импульсной техники», Москва

## Введение

Источники ультрафиолетового (УФ) излучения применяются для обеззараживания различных сред, в медицине, для обработки поверхностей, для полимеризации лаков и красок, в фотохимии, микроэлектронике, в системах диагностики и множестве других областей. Наибольший интерес представляют ртутные газоразрядные лампы низкого давления, имеющие высокую мощность, высокий КПД преобразования электрической энергии в УФ излучение (35–45 %) и большой ресурс. В таких лампах оптимальное давление паров ртути составляет 5–10 мторр, а давление газовой смеси (как правило, неон-аргон) – несколько торр. Удельная мощность УФ излучения для ртутных ламп составляет 0,2–0,5 Вт/см. В лампах с мощностью УФ излучения более 0,5 Вт/см вместо металлической ртути используют амальгаму, позволяющую поддерживать оптимальное давление паров ртути при высоких температурах, характерных для мощных ламп [1]. В амальгамных лампах низкого давления большая часть ртути находится в связанном состоянии, в виде пара присутствуют только сотые доли мг на лампу [2], когда ее поверхность нагрета до рабочей температуры 100–130 °С. Концентрация паров ртути внутри выключенной лампы при комнатной температуре сравнима с предельно-допустимой концентрацией, поэтому такие лампы представляют значительно меньшую экологическую опасность, чем ртутные. Кроме того, использование амальгамы значительно облегчает проблему утилизации ламп, отработавших свой ресурс. Спектр ртутного разряда содержит две интенсивные резонансные УФ линии 253,65 и 184,95 нм. Вакуумное УФ излучение (ВУФ) с длиной волны меньше 200 нм поглощается в воздухе молекулярным кислородом с образованием озона. Сегодня растет интерес к использованию ВУФ излучения ртутного разряда, особенно в сочетании с излучением резонансной линии 254 нм. В частности, сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм можно эффективно использовать в задачах фотохимической очистки воздуха от загрязнений [3].

Амальгамные лампы разрабатывались для систем обеззараживания, поэтому была исследована генерация излучения на бактерицидной линии 254 нм, а линия 185 нм в большинстве случаев даже не измерялась, поскольку колба лампы была изготовлена из

специального кварца, который не пропускает эту линию. Целью настоящей работы является исследование генерации линии 185 нм амальгамной лампой в области низких давлений буферного газа.

## Параметры, определяющие выход ВУФ излучения

Интенсивность и КПД генерации ВУФ излучения газового разряда зависят от температуры электронов плазмы разряда  $T_e$ . Электронный уровень атома ртути  $6^1P_1$ , ответственный за генерацию линии 185 нм, расположен значительно выше уровня  $6^3P_1$ , с которого излучается линия 254 нм. Для повышения эффективности генерации ВУФ излучения необходимо повышать температуру электронов. Однако, с ростом температуры электронов растут потери на возбуждение более высоких уровней  $6^3D$  и  $7^3S$ , релаксация которых происходит с излучением в видимом диапазоне. Также с ростом температуры электронов растут потери энергии электронов на упругие соударения с атомами инертного газа. Таким образом, существует оптимальное значение температуры электронов, позволяющее получить максимальное значение КПД генерации излучения. Оптимальное значение КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм будет достигаться при более высоких температурах электронов, нежели для излучения с длиной волны 254 нм. Температура электронов в ртутной амальгамной лампе низкого давления находится в области 1 эВ и, в свою очередь, определяется рядом параметров лампы.

В ртутных УФ лампах низкого давления в качестве инертного газа обычно используется смесь Ne и Ar. Часто в современной ламповой промышленности используется смесь 60 % Ne/40 % Ar. При давлении газовой смеси ниже 1 торр, КПД генерации излучения линии 254 нм растет с ростом давления. Причиной этого является уменьшение энергетических потерь на ионизацию, а, следовательно, и уменьшение  $T_e$ . Эффективность возбуждения состояния  $6^3P_1$  при этом увеличивается, однако интенсивность излучения при этом уменьшается. С дальнейшим ростом давления в области свыше 1 торр, КПД генерации линии 254 нм начинает падать, поскольку растут потери энергии на упругие столкновения. Выход УФ и ВУФ излучения также зависит от диаметра плаз-

менного столба и концентрации атомов ртути, поскольку для резонансных линий существует эффект «пленения» излучения [4]. При большом диаметре плазменного столба уменьшается  $T_e$ , что приводит к падению КПД, а также уменьшается выход УФ излучения за счет эффекта «пленения». Время жизни возбужденного состояния  $6^3P_1$  много меньше, чем для состояния  $6^1P_1$  [4], поэтому эффект пленения линии 185 нм может оказаться не столь значителен, как для линии 254 нм.

Преимуществом амальгамных ламп является возможность достижения оптимального значения давления ртути в разряде при заранее заданной температуре стенки. Достигается такой эффект оптимизацией состава амальгамы. С ростом силы и плотности тока интенсивность излучения разряда растет до насыщения, обусловленного приближением к равновесию между возбуждающими и тушащими соударениями атомов ртути с электронами. КПД лампы при этом падает за счет роста числа соударений второго рода. Рост ионизации возбужденных атомов с ростом силы тока разряда приводит к падению напряженности электрического поля и  $T_e$ . Повышение давления паров ртути также уменьшает напряженность электрического поля. [4, 5].

Интенсивность и КПД генерации УФ и ВУФ излучения амальгамной лампой низкого давления определяются большим набором взаимосвязанных параметров [4–6]. Экспериментальные исследования ВУФ излучения затруднены по ряду причин. Весельнички И.М. было проведено систематическое исследование зависимости характеристик ртутного разряда от широкого набора параметров [6]. Давление паров ртути поддерживалось во время измерений на заданном уровне путем поддержания требуемой температуры в специальном отростке с ртутью. Вся лампа погружалась в «водяную баню», температура которой поддерживалась на 10 °С выше, чем в отростке. Давление ртути подбиралось соответствующим максимуму излучения линии 254 нм. Исследование проводилось при частоте тока разряда 50 Гц. Погрешности определения светового потока составляли не менее 7–8 %. Условия данных экспериментов значительно отличались от условий эксплуатации современных ламп. Для создания эффективной озоновой амальгамной лампы низкого давления, необходимо провести исследования зависимости интенсивности и КПД генерации ВУФ излучения от широкого ряда параметров.

### Экспериментальная установка

Исследования зависимости интенсивности УФ излучения лампы от параметров разряда выполнены с помощью вакуумного монохроматора McPherson Model 218 с решеткой 600 штрихов/мм. Давление в камере монохроматора было менее  $10^{-3}$  торр. Окна монохроматора изготовлены из фторида магния  $MgF_2$ , пропускающего излучение с длинами волн более 105 нм. На выходе монохроматора установлен

фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) PMT 658-1 (Hamamatsu R6095). Сигнал ФЭУ измерялся с помощью пикоамперметра KEITHLEY 6485. Экспериментально было определено оптимальное ускоряющее напряжение ФЭУ равное 350 В. Темновой ток ФЭУ при этом составлял менее 0,1 нА. Электрические параметры разряда измерялись с помощью анализатора мощности Yakogawa PZ4000 с погрешностью не более 3 %.

Для обеспечения режима работы лампы, близкого к реальному, была создана экспериментальная камера. Камера представляет собой металлический цилиндр длиной 100 см и диаметром 20 см, вдоль оси которого устанавливалась лампа. Перпендикулярно к оси камеры на середине ее длины был врезан металлический патрубок диаметром 9 см и длиной 20 см, с помощью которого камера присоединялась к входному окну вакуумного монохроматора. Измерение интенсивности излучения производилось поперек разрядной трубки для участка длиной около 1 см. Поскольку при работе ВУФ лампы в воздухе происходит образование озона, то для сохранения теплового баланса лампы и предотвращения образования озона, экспериментальная камера и патрубок заполнялись азотом. Концентрация озона в камере контролировалась с помощью анализатора Циклон 5.51. Рассчитанная систематическая ошибка измерений интенсивности излучения лампы на данном стенде составила около 4 %.

Для экспериментов были изготовлены две серии амальгамных ламп с межэлектродным расстоянием 775 мм. Колбы ламп были изготовлены из специально очищенного кварцевого стекла производства компании Raesch. Внутренний диаметр трубки составлял 16 мм, толщина стенки 1,5 мм, на внутреннюю поверхность трубки было нанесено специальное защитное покрытие из оксида алюминия [7, 8]. Такое покрытие является оптимальным для создания мощных озоновых газоразрядных ламп. Коэффициент пропускания колб ламп на длинах волн 185 и 254 нм с нанесенным защитным покрытием был проверен с помощью спектрофотометра Varian Cary 50. Коэффициенты пропускания совпали, относительное отклонение при этом оказалось менее 5 %. В качестве буферного газа использовалась смесь Ne/Ar (60 % / 40 %) при давлениях  $P$  в диапазоне 0,3–2 торр.

В качестве стабилизированных источников тока с частотой 30–70 кГц использовались серийные электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА) производства Golden Way Corp. (EF23701FL) и АО «ЭНЭФ» (Л~220-1x300-2222-16, Л~220-1x350-2222-18. С использованием данных аппаратов, эффективное значение силы тока можно было задавать в диапазоне 0,44–3,2 А. Погрешность обеспечения требуемой силы тока составляла менее 0,05 А. Напряжение на лампе измерялось с помощью мультиметра UniTrend UT71E. Кроме того, с помощью UT71E измерялась температура стенки колбы лампы. Точность измерения среднеквадратичного напряжения прибором UT71E составляет 0,4 %.

## Результаты экспериментов и обсуждение

Давление паров ртути в разряде определяется температурой амальгамы. В экспериментальных условиях прогрев амальгамы занимает около 15 минут. Поскольку времена релаксации плазмы значительно меньше, то измеряя динамику излучения и напряжения на лампе, мы можем наблюдать зависимость параметров разряда от давления паров ртути (рис. 1). Это в значительной мере упрощает проведение экспериментов по определению оптимального значения давления паров. Давления паров ртути, которые оптимальны для генерации линий 254 и 185 нм в общем случае различаются, хотя и могут принимать близкие значения при определенных параметрах разряда. В данной работе, исследовались параметры, обеспечивающие максимальную интенсивность излучения на длине волны 185 нм ( $I_{185}$ ). Наблюдаемая при измерениях ламп статистическая погрешность вызвана, в первую очередь, точностью определения момента, в который достигается максимальная интенсивность линии 185 нм. Данная погрешность составляет около 5 % для определения интенсивности лампы и около 3 % для напряжения на лампе.

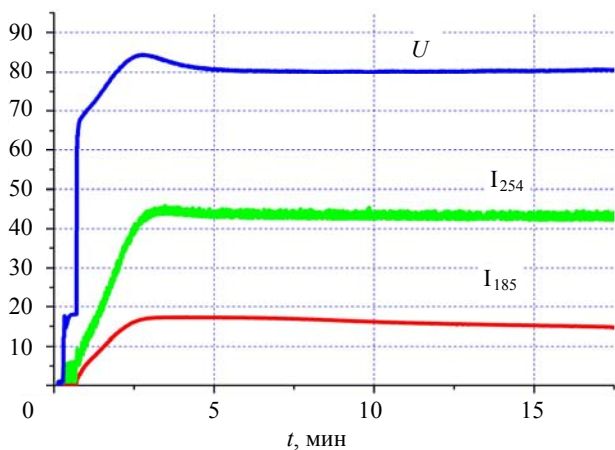
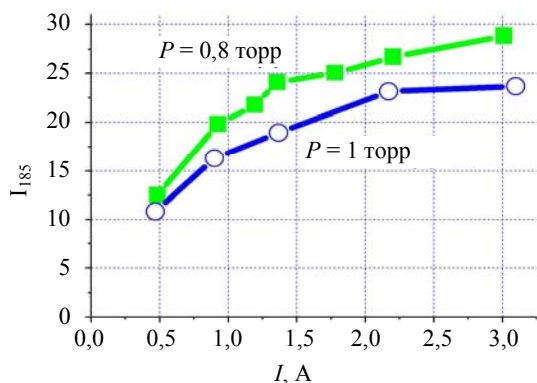


Рис. 1. Зависимость напряжения на лампе  $U$  (В) и интенсивности излучения линий 185 нм  $I_{185}$  и 254 нм  $I_{254}$  (относительных единиц) от времени  $t$  (мин).  $P = 1,2$  торр, сила тока 1,6 А



После включения лампы с ростом температуры стенки лампы растет и концентрация атомов ртути в плазме разряда. При этом интенсивность излучения линий 185 и 254 нм растет, достигая максимума (рис. 1). При дальнейшем росте температуры, в согласии с теорией, интенсивность падает, выходя на некоторое стационарное состояние. Подобный максимум интенсивности в ряде экспериментов не наблюдался. Это связано с тем, что амальгама лампы не содержала достаточно ртути, для достижения оптимального давления паров ртути при полученных температурах стенки лампы (около 150 °С). Надлежащим подбором амальгамы можно добиться того, чтобы давление паров ртути в стационарном режиме оставалось вблизи максимума. Оптимальные давления паров ртути для линий 185 и 254 нм, в общем случае, различаются. В ряде экспериментов они почти совпадали. При других параметрах лампы они значительно различались, причем максимум интенсивности излучения линии 185 нм обычно достигался при меньших давлениях паров ртути. Таким образом, подбирая параметры лампы, можно изменить соотношение интенсивностей линий 185 ( $I_{185}$ ) и 254 нм ( $I_{254}$ ). Поскольку потери на излучение линии 254 нм составляют значительную часть в энергетическом балансе лампы, то рост отношения  $I_{185}/I_{254}$  позволит повысить КПД генерации ВУФ излучения.

На рис. 2 показана зависимость параметров лампы от тока разряда при начальных давлениях буферной смеси  $P = 0,8$  и  $P = 1$  торр. Интенсивность ВУФ излучения  $I_{185}$  при обоих давлениях растет с ростом тока. При давлении 1 торр интенсивность  $I_{185}$  достигает насыщения при токе около 2 А. Для лампы с давлением 0,8 торр насыщение  $I_{185}$  достигнуто не было. Напряжение на лампе  $U$  падает с ростом силы тока за счет роста доли ионизаций возбужденных атомов ртути. КПД генерации ВУФ излучения ( $k_{185}$ ) с ростом силы тока также падает за счет роста числа соударений II рода возбужденных атомов ртути с электронами.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности и КПД генерации ВУФ излучения амальгамной лампой от давления буферного газа при различ-

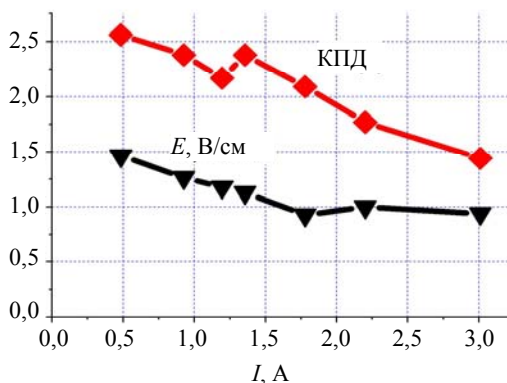


Рис. 2. Зависимость параметров лампы от силы тока разряда  $I$ . Слева: интенсивность  $I_{185}$  (отн. ед.)  $P = 0,8$  торр (квадраты) и 1 торр (окружности). Справа: Напряженность электрического поля (треугольники) и КПД  $k_{185}$  (ромбы) для лампы с давлением 0,8 торр

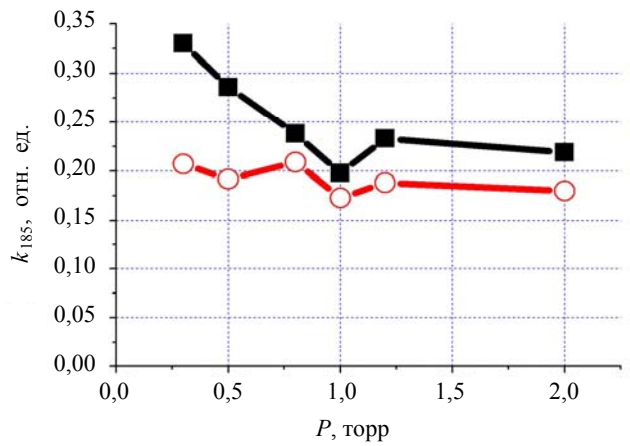
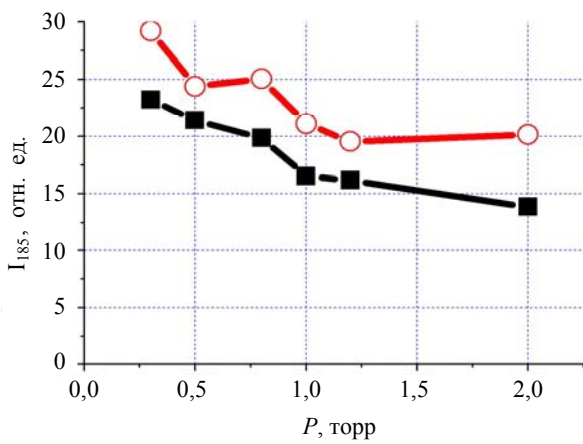


Рис. 3. Зависимость интенсивности  $I_{185}$  (отн. ед.) (слева) и КПД  $k$  (отн. ед.) (справа) генерации излучения 185 нм от давления буферного газа. Сила тока разряда 1 А (квадраты) и 1,85 А (окружности)

ных разрядных токах. В соответствии с теорией понижение давления ниже 1 торр приводит к резкому росту интенсивности излучения. Данный эффект наблюдается как при силе тока разряда 1,85 А, так и при 1 А. КПД генерации ВУФ излучения при этом ведет себя различно. Для разряда с током 1,85 А его значение остается практически постоянным, а при токе 1 А КПД значительно растет в области низких давлений. Таким образом, представляет интерес промышленное изготовление ВУФ ламп с подобными параметрами. Однако, при понижении давления буферного газа значительно возрастает нагрузка на защитное покрытие колбы лампы [1, 7] и, что еще более важно, нагрузка на электроды [9, 10]. Распыление эмитирующего вещества с поверхности электрода приводит к значительному сокращению срока службы лампы. Так, при давлении буферного газа 0,15 торр ресурс работы лампы составил всего несколько часов. Поэтому целесообразно использовать источники с более высоким давлением инертного газа в области 1 торр, хотя это и приводит к уменьшению интенсивности и КПД генерации излучения линии 185 нм.

### Заключение

Исследована зависимость интенсивности и эффективности генерации линии 185 нм от давления инертного газа и силы тока разряда. Интенсивность излучения растет с ростом тока и достигает насыщения при токе около 2 А при давлениях буферного газа 1–2 торр. При давлениях менее 1 торр насыщения не наблюдалось вплоть до тока 3,2 А, однако КПД генерации линии 185 нм при этом уменьшался. Обнаружено, что эффективность генерации линии 185 нм слабо зависит от начального давления буферного газа в диапазоне 1–2 торр. При понижении давления ниже 1 торр интенсивность значительно возрастает. Более того, КПД при этом также растет за счет падения рассеяния энергии электронов на упругие взаимодействия. Однако при низких давлениях буферного газа возрастает нагрузка на защитное по-

крытие колбы лампы. Кроме этого, электроды лампы в таком режиме подвергаются значительной тепловой нагрузке, что приводит к распылению эмитирующего покрытия электрода. При давлении буферного газа 0,15 торр ресурс работы лампы составил всего несколько часов. Поэтому при современном технологическом уровне целесообразно использовать давления буферного газа свыше 1 торр. Путем подбора состава амальгамы можно обеспечить оптимальное давление паров ртути в разряде при различных условиях работы лампы.

### Литература

1. Василяк Л. М., Васильев А. И., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. Прикладная физика. 2009, № 1. С. 120–124.
2. Василяк Л. М. Электронная обработка материалов. 2009, № 1. С. 30–40.
3. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998.
4. Миленин В. М. Тимофеев Н. А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. Л.: 1991.
5. Уэммаус Д. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977.
6. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Кузьменко М. Е., Печеркин В. Я. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 83–88.
8. Voronov A. New generation of low pressure mercury lamps for producing ozone // Proceedings of World congress on ozone and UV technologies. LA California USA 2007. С. 2166–2172.
9. Василяк Л. М., Васильев А. И., Костюченко С. В., Соколов Д. В., Старцев А. Ю., Кудрявцев Н. Н. Прикладная физика. 2010, № 3. С. 18–23.
10. Василяк Л. М., Васильев А. И., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Микаева С. А., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. Инженерная физика. 2009, № 1. С. 25–31.

# ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА МАХА УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА РОСТ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ ГАЗОВ

А. С. Соколова, Н. В. Невмержицкий, Е. Д. Сеньковский, Е. А. Сотсков,  
А. А. Половников, Е. А. Левкина, Л. А. Лобов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Гидродинамические неустойчивости (Рэлея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова [1–3]) и связанное с ними турбулентное перемешивание являются одним из препятствий при попытках достижения высоких плотностей энергии.

Для описания развития этих неустойчивостей применяются численные методы и различного рода полуэмпирические модели. Все они требуют калибровки по результатам экспериментов. При этом важно, чтобы длина волны  $\lambda$  и амплитуда  $a_0$  начальных возмущений на контактной границе (КГ) веществ в экспериментах были известны.

С течением времени развитие малых начальных возмущений на границе приводит к турбулентному перемешиванию (ТП) контактирующих сред, при этом ширина зоны перемешивания растет со временем.

Различными авторами предложено несколько приближенных выражений для оценки скорости роста зоны ТП, развивающейся из неустойчивости Р–М.

Согласно [4] ( $k$ - $\varepsilon$  модель) получены следующие выражения для момента перехода от этапа развития неустойчивости к ТП и зависимости ширины ЗТП от времени

$$t_0 = \frac{Re v}{4(a_* A_+ U k)^2}, \quad (1)$$

$$L = \frac{4}{k} \left[ 1 + \frac{a_* |A_+| U k^2}{5,5 p} (t - t_0) \right]^P, \quad (2)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $U$  – скорость КГ;  $\lambda$  –

длина волны;  $A_+$ ,  $a_* = a_0 \left( 1 - \frac{U}{D} \right)$  – число Атвуда и амплитуда возмущений после взаимодействия УВ с КГ;  $D$  – скорость падающей на контактную границу ударной волны.

Отметим, что  $k$ - $\varepsilon$  модель является общепризнанной. Ее используют многие исследователи, хотя она не лишена недостатков [4].

Показатель степени  $p$  характеризует степень затухания турбулентности. По данным [4]  $p = 0,3$ ; по данным [5] –  $p \sim 0,25$ . В экспериментах [6], имитирующих обжатию мишеней инерциального термо-

ядерного синтеза, при скорости УВ  $D \approx 40$  км/с получено значение  $p \approx 0,5 \pm 0,1$ . Такое высокое значение  $p$  в [6] строго не объясняется.

В 2003 году в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ создана методика, позволяющая исследовать развитие турбулентного перемешивания на контактной границе газов в диапазоне чисел Маха ударной волны от 1,5 до 10. При помощи этой методики проведен ряд экспериментов по исследованию развития возмущений и турбулентного перемешивания на контактной границе газов [7]. В этих работах при исследовании ТП начальные возмущения специально не задавались. Ими служили фрагменты разрушившейся плоской полимерной пленки, изначально разделяющей газы.

В данной работе представлены результаты аналогичных экспериментов с заданными на контактной границе периодическими трехмерными возмущениями, а также обработка результатов экспериментов по формуле (2).

## Техника экспериментов

Эксперименты проводились на ударной трубе по схеме рис. 1.

Ударная труба состояла из камеры высокого давления (драйвер) и низкого давлений и глушителя. Камера высокого давления герметично отделялась от камеры низкого давления мембраной из лавсана толщиной  $\sigma = 0,05 \pm 0,15$  мм. Камера низкого давления состояла

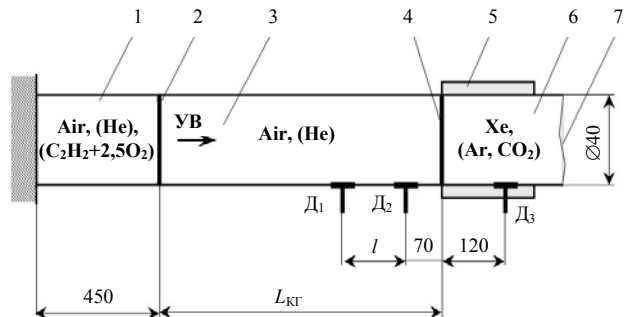


Рис. 1. Схема ударной трубы (размеры даны в мм): 1 – камера высокого давления; 2 – мембрана; 3 – канал входной; 4 – разделительная пленка (КГ); 5 – измерительная секция; 6 – канал выходной; 7 – мембрана; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> – датчики давления



из входного и выходного каналов и измерительной секции с внутренним сечением 40×40 мм. Измерительная секция от входного канала герметично отделялась тонкой ( $\sigma \approx 2$  мкм) полимерной пленкой с заданными периодическими 3D-возмущениями, выходной канал от глушителя – мембраной из лавсана, толщиной 0,05 мм.

Объем измерительной секции и выходного канала заполнялся «тяжелым» газом –  $SF_6$  ( $\rho_0 = 6,5$  г/л,  $C_0 = 129,5$  м/с),  $CO_2$  ( $\rho_0 = 1,9$  г/л,  $C_0 = 270$  м/с). В выходном канале и глушителе находился воздух ( $\rho_0 = 1,205$  г/л,  $C_0 = 342$  м/с) при атмосферных условиях.

Газы изначально находились при атмосферных условиях. Чистота газов определялась по интерферометру ШИИ и составляла не менее 97%. Драйвер заполнялся газовой взрывчатой смесью (ГВС)  $C_2H_2+2,5O_2$  с избыточным давлением или сжатым гелием.

### Работа установки

После подрыва ГВС вниз по течению распространяется детонационная волна (ДВ). При касании ДВ мембраны последняя разрушается, происходит распад разрыва: в легкий газ (в камеру низкого давления) идет ударная волна. При прохождении УВ через тонкую пленку (границу раздела «легкого» и «тяжелого» газов) опять происходит распад разрыва: в «тяжелый» и «легкий» газ идут УВ. При этом тонкая пленка разрушается, контактная граница газов ускоряется, на ней возникает Р–М неустойчивость, приводящая к росту возмущений и образованию зоны перемешивания контактирующих газов, растущей со временем по ширине.

Регистрация течения проводилась шпирен-методом скоростной видеокамерой СФР-7 в покадровом режиме. Скорость УВ в газах определялась по временным показаниям датчиков давления  $D_1, D_2, D_3$  и по кинограммам экспериментов. Эксперименты проводились при температуре  $T = 21 \pm 2$  °С.

Начальные возмущения на контактной границе задавались при помощи тонкой полимерной пленки следующим образом. Сырая пленка накладывалась на торец измерительной секции. Затем на нее устанавливалась матрица с 25 металлическими пуансонами диаметром 4 мм со скруглением на конце  $R = 2$  мм. Затем снизу подавался сжатый воздух давлением  $\approx 0,05$  атм: под действием воздуха пленка между пуансонами прогибалась. После высыхания пленки воздух стравливался, и под матрицей создавалось разрежение  $\approx 0,05$  атм, пленка отходила от пуансонов, пуансоны убирались. В итоге получалась тонкая пленка с трехмерными синусоидальными возмущениями с длиной волны  $\lambda = 8$  мм и высотой до  $a_0 = 1,5$  мм. На рис. 2 представлена фотография такой пленки с заданными 3D возмущениями.

Судя по интерференционным цветам, толщина пленки составляла  $\sigma \approx 2$  мкм. Такая пленка при чис-

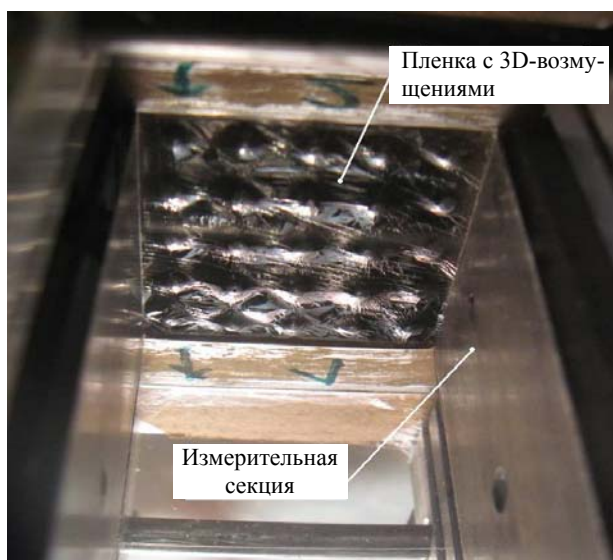


Рис. 2. Фотография пленки с заданными 3D-возмущениями без пуансонов

лах Маха ударной волны  $M > 5$  разлагается [8] и мало влияет на характер течения. При меньших числах Маха фрагменты пленки могут приводить к дополнительной турбулентности потока, но это не является определяющим в развитии зоны перемешивания.

### Расчеты газодинамического течения

Одномерные газодинамические расчеты течения в экспериментах проводились по программе «РОСА» [18] в плоской геометрии (без учета ТП). На рис. 3 представлена общая схема расчетов.

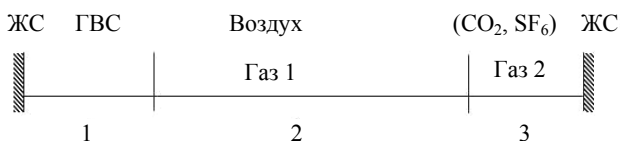


Рис. 3. Схемы расчетов

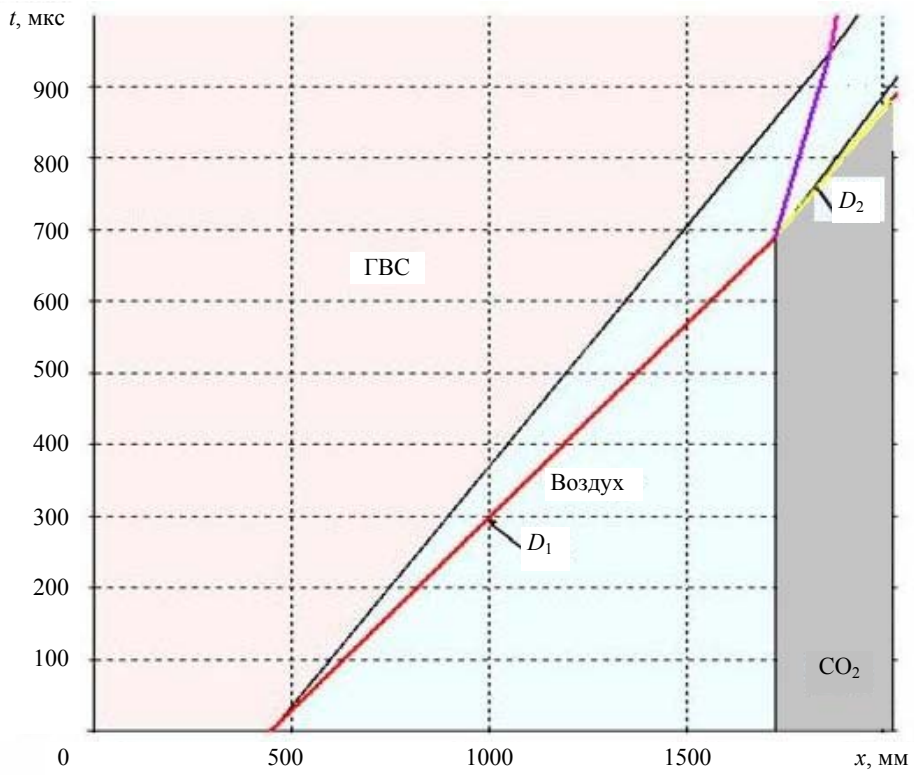
Параметры и геометрические размеры областей 1–3 взяты в соответствии с проведенными экспериментами.

При расчетах в областях 2 и 3 использовалось уравнение состояния идеального газа.

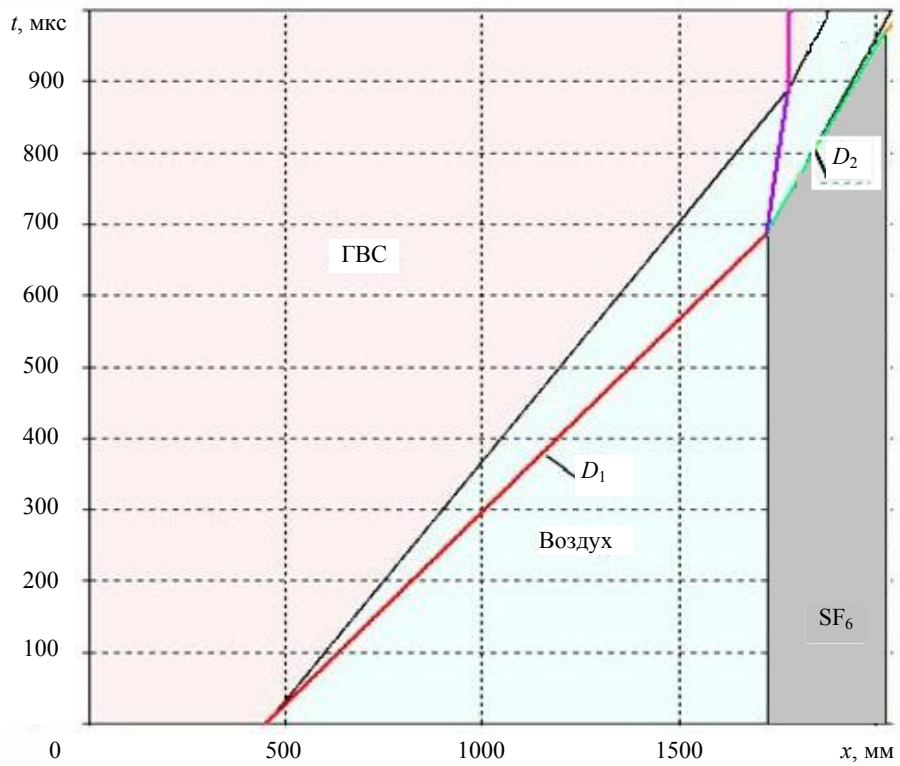
Для описания процесса в ГВС так же применялся УРС идеального газа с  $\rho_0 = 0,0012375$  г/см<sup>3</sup> и  $\gamma = 1,16$ . Применялась модель мгновенной детонации всей области.

Результаты расчетов приведены на рис. 4, где  $D_1$  и  $D_2$  – скорости УВ в газах 1 и 2, полученные в расчетах. Расчеты показывают, что на исследуемую контактную границу газов отраженные волны не приходят за время регистрации. Расчетные значения  $D_1$  и  $D_2$  близки к экспериментальным (см. табл. 1).





а



б

а – граница Воздух-SF<sub>6</sub> ( $D_1 = 1850$  м/с,  $D_2 = 1100$  м/с);  
 б – граница Воздух-CO<sub>2</sub> ( $D_1 = 1800$  м/с,  $D_2 = 1500$  м/с)

Рис. 4. Расчетные  $X(t)$  диаграммы течений при  $P_{ГВС} = 9,5$  атм

Номер опыта	Вид КГ	Драйвер, $P_0$ , атм	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$D_1$ , м/с	$D_2$ , м/с	$D_{2p}$ , м/с	$U_{КГР}$ , м/с	$M_1$	$M_2$	$\rho_{2S}$ , г/л	$\rho_{1S}$ , г/л	A
893	B-SF <sub>6</sub>	11	1,39	1,074	822	452	426	373	2,38	3,5	52,8	5,8	0,8
894	B-SF <sub>6</sub>	30	1,378	1,07	1236	652	693	644	3,6	5,2	97	8,9	0,83
895	B-SF <sub>6</sub>	33	1,37	1,07	1304	689	733	687	3,8	5,3	102,8	9,2	0,84
899	B-SF <sub>6</sub>	84	1,33	1,064	1956	1144	1117	1110	5,7	8,8	151,9	12,7	0,85
901	B-SF <sub>6</sub>	13	1,39	1,074	821	412	425	373	2,4	3,2	60,6	6,8	0,81
966	B-SF <sub>6</sub>	17,6	1,378	1,2	1214	923	1014	865	3,6	3,4	12,9	6,1	0,36
971	B-CO <sub>2</sub>	45,2	1,344	1,168	1900	1380	1608	1448	5,6	5,1	19,1	8,1	0,4
972	B-CO <sub>2</sub>	44,2	1,344	1,17	1883	1604	1591	1430	5,5	5,9	18,8	8	0,4

Обозначения в таблице:  $P_0$  – давление в драйвере ударной трубы;  $\gamma_1$  – эффективный показатель адиабаты воздуха из [9] (принимался по экспериментальному значению  $D_1$ );  $\gamma_2$  – эффективный показатель адиабаты газа 2 (SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>), (взяты из [10] по ожидаемой в экспериментах температуре и давлению);  $D_1$  и  $D_2$  – экспериментальное значение скорости ударной волны в газах 1 и 2 соответственно;  $D_{2p}$  – расчетное значение скорости УВ в газе 2;  $U_{КГР}$  – расчетное значение скорости КГ;  $M_1$  и  $M_2$  – число Маха ударной волны в газе 1 и в газе 2 соответственно;  $\rho_{1S}$  – плотность в газе 1 (в воздухе) после распада разрыва (с учетом отраженной волны);  $\rho_{2S}$  – плотность в газе 2 после распада разрыва.

### Результаты экспериментов и их анализ

Длина волны возмущений в экспериментах была постоянной и, согласно [7], определялась как  $\lambda = ((\lambda_x)^{-2} + (\lambda_y)^{-2})^{-1/2}$ . В экспериментах  $\lambda_x, \lambda_y = 8 \pm 0,3$  мм, тогда  $\lambda = 5,6 \pm 0,2$  мм.

В табл. 1 представлены условия проведения экспериментов и результаты расчетов параметров течения, возникающих после распада разрыва на КГ, рассчитанные по методу Ф. К. Годунова.

В табл. 2 представлены некоторые параметры течения, которые принимались при описании ширины зоны перемешивания  $k$ - $\epsilon$  моделью.

На рис. 5 и 6 представлены характерные кинограммы течения в экспериментах, на рис. 7 и 8 – зависимости ширины зоны перемешивания  $L$  от времени  $t$ .

По приведенным результатам видно, что

- с ростом амплитуды начальных возмущений ширина зоны перемешивания увеличивается, что учитывается в  $k$ - $\epsilon$  модели, периодическая структура в зоне перемешивания наблюдается длительное время;
- при числах Маха ударной волны в тяжелом газе  $M_2 \leq 3,6$   $k$ - $\epsilon$  модель описывает ширину зоны перемешивания с показателем степени, равным  $P \approx 0,3$ ;
- при увеличении числа Маха  $3,6 \leq M_2 \leq 9,5$  показатель степени  $k$ - $\epsilon$  модели увеличивается до  $P \approx 0,5$ .

Таблица 2

№ опыта	Вид КГ	$M_2$	$a_0$ , мм	$a_*$ , мм	$a_0/a_*$	$\lambda/a_*$	$10^{-7} \frac{\mu_1}{\text{Па} \cdot \text{с}}$	$10^{-7} \frac{\mu_2}{\text{Па} \cdot \text{с}}$	$10^{-6} \frac{\nu}{\text{м}^2/\text{с}}$	$Re_{\max}, 10^6$	$t_0$ , мкс
893	B-SF <sub>6</sub>	3,5	1,8	1	1,8	5,6	306	290	1,02	0,85	2
894	B-SF <sub>6</sub>	5,2	0,9	0,52	1,73	10,8	484	300	0,74	0,9	2,6
895	B-SF <sub>6</sub>	5,3	0,6	0,33	1,82	17	510	300	0,72	0,67	3,6
899	B-SF <sub>6</sub>	8,8	1,2	0,57	2,11	9,8	732	468	0,73	2	1,2
901	B-SF <sub>6</sub>	3,2	0,55	0,3	1,8	18,7	339	253	0,88	0,3	6,5
966	B-SF <sub>6</sub>	3,4	1	0,42	2,4	13,3	430,1	351	4,1	0,076	5,4
971	B-CO <sub>2</sub>	5,1	1	0,35	2,9	16	519	494	3,7	0,14	3,5
972	B-CO <sub>2</sub>	5,9	0,8	0,27	3	20,7	519	494	3,8	0,104	4,4

Примечание:  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости ( $\nu = \frac{(\mu_T + \mu_L)}{(\rho_{2S} + \rho_{1S})}$ , где  $\mu_T$  и  $\mu_L$  – коэффициенты динамической вязкости газов. Они определялись с учетом давления и температуры в эксперименте);  $Re_{\max}$  – максимальное число Рейнольдса  $Re_{\max} = \frac{8}{e} \times \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \times \frac{|a_{lin}|}{\nu}$ , где  $a_{lin} = A_+ (2\pi / \bar{\lambda}) U a_*$ ;  $t_0$  – время перехода развития возмущений в турбулентную стадию (по формуле (1)).

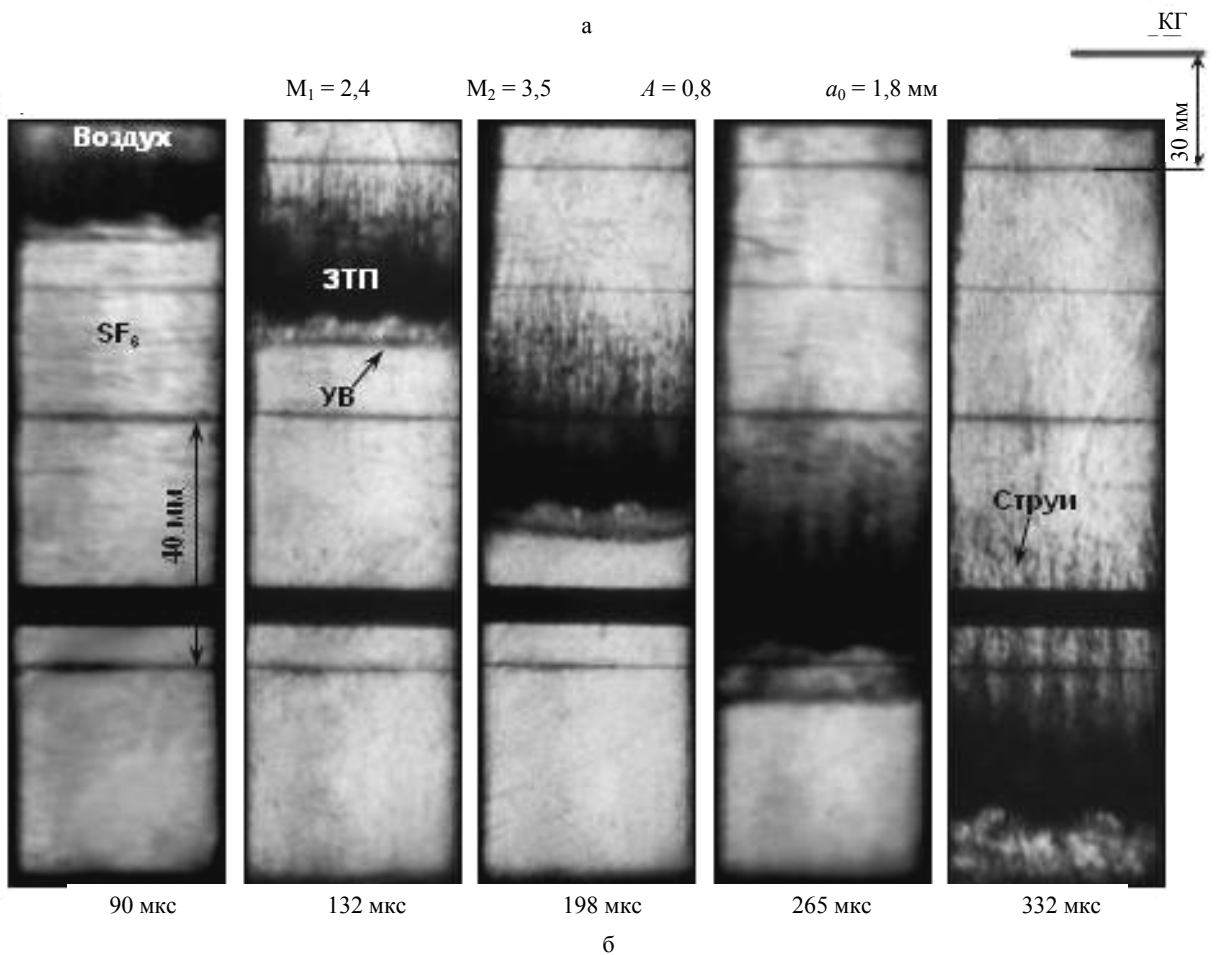
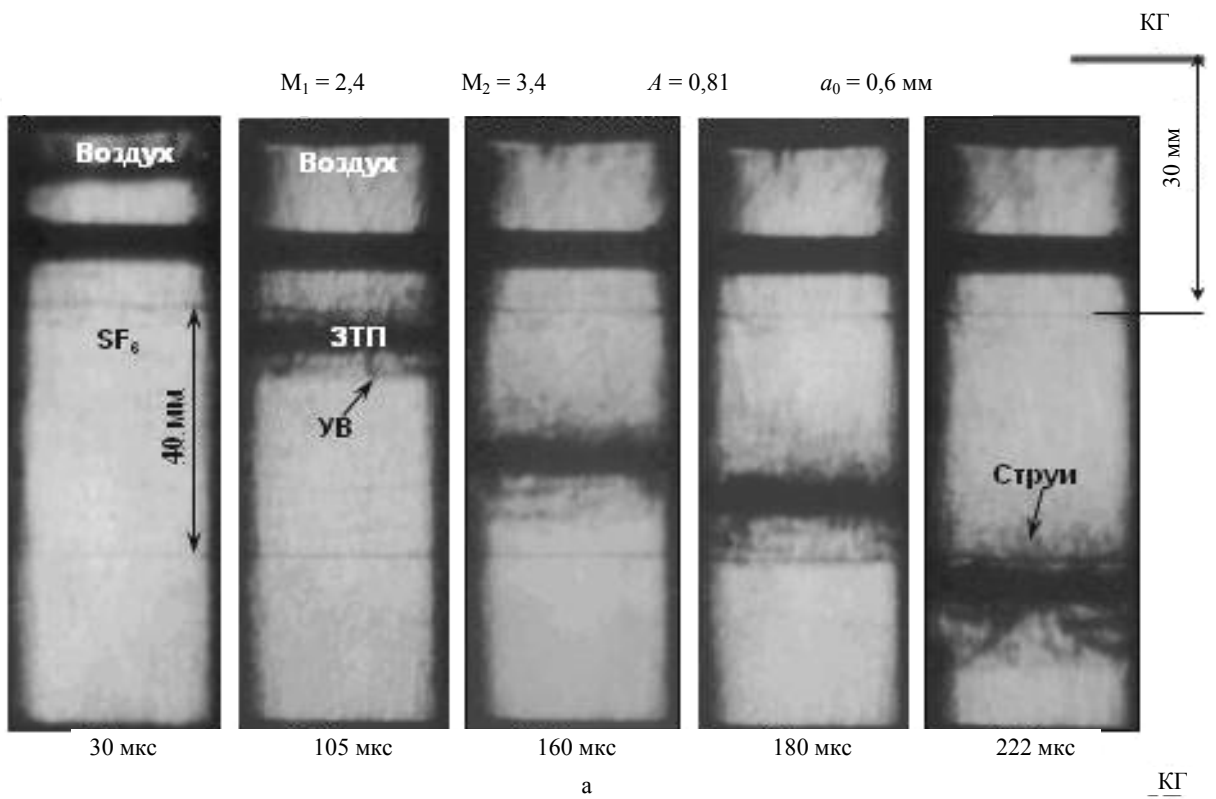
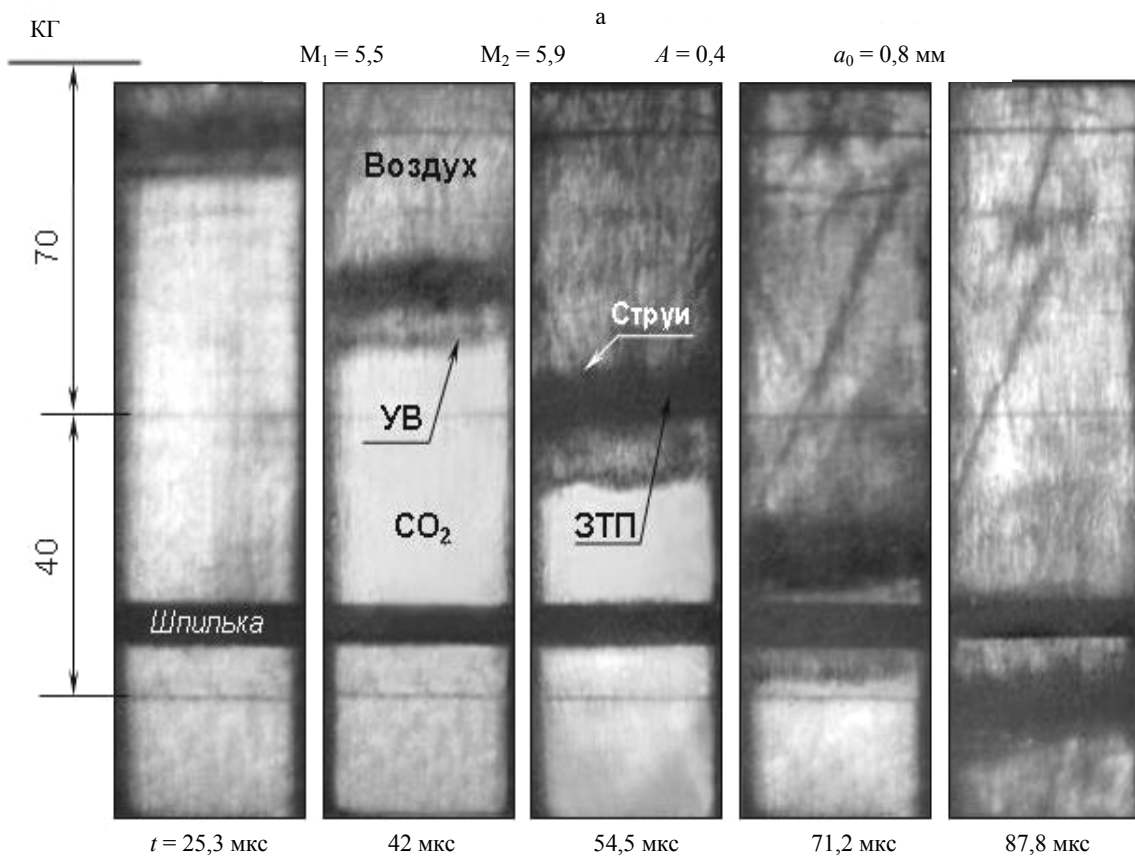
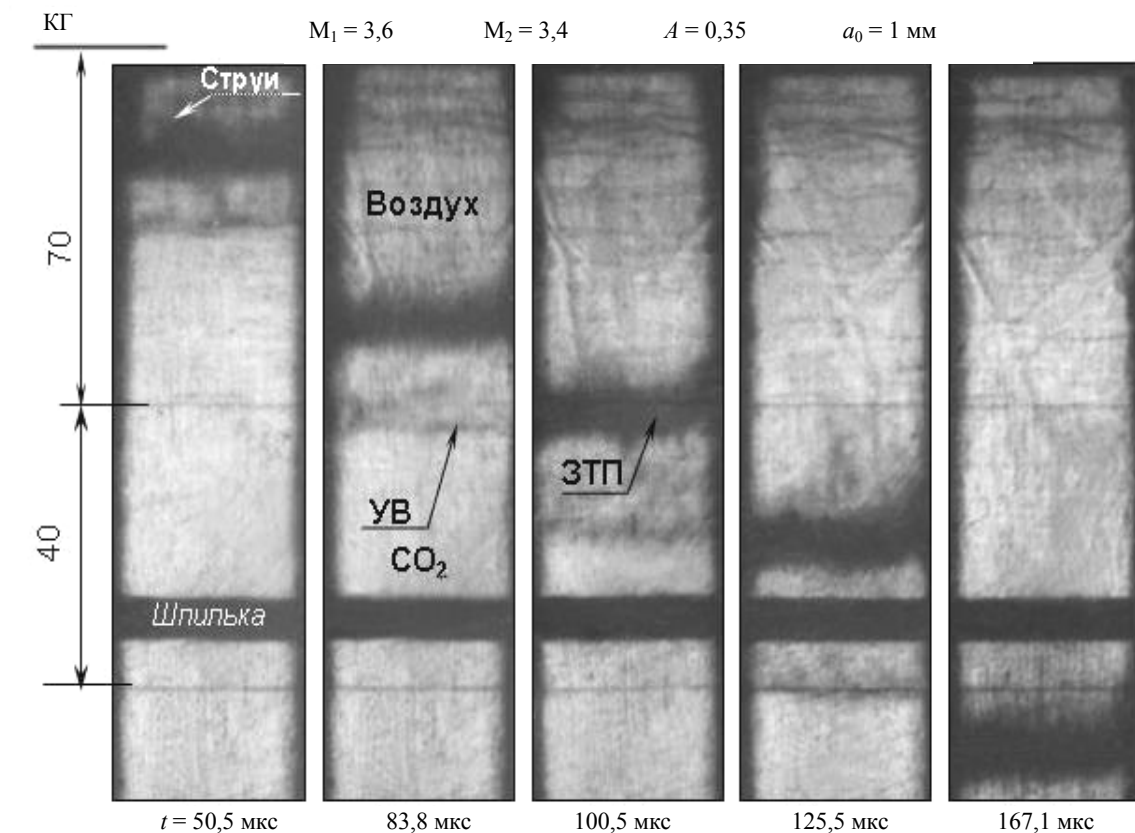


Рис. 5. Развитие турбулентного перемешивания на границе воздух – SF<sub>6</sub> при одинаковых значениях  $M_2$  и различных амплитудах 3D-возмущений. УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы: а – опыт № 901; б – опыт № 893



б

Рис. 6. Кинограммы экспериментов с CO<sub>2</sub>, КГ – контактная граница; ЗТП – зона турбулентного перемешивания: а – опыт № 966; б – опыт № 972

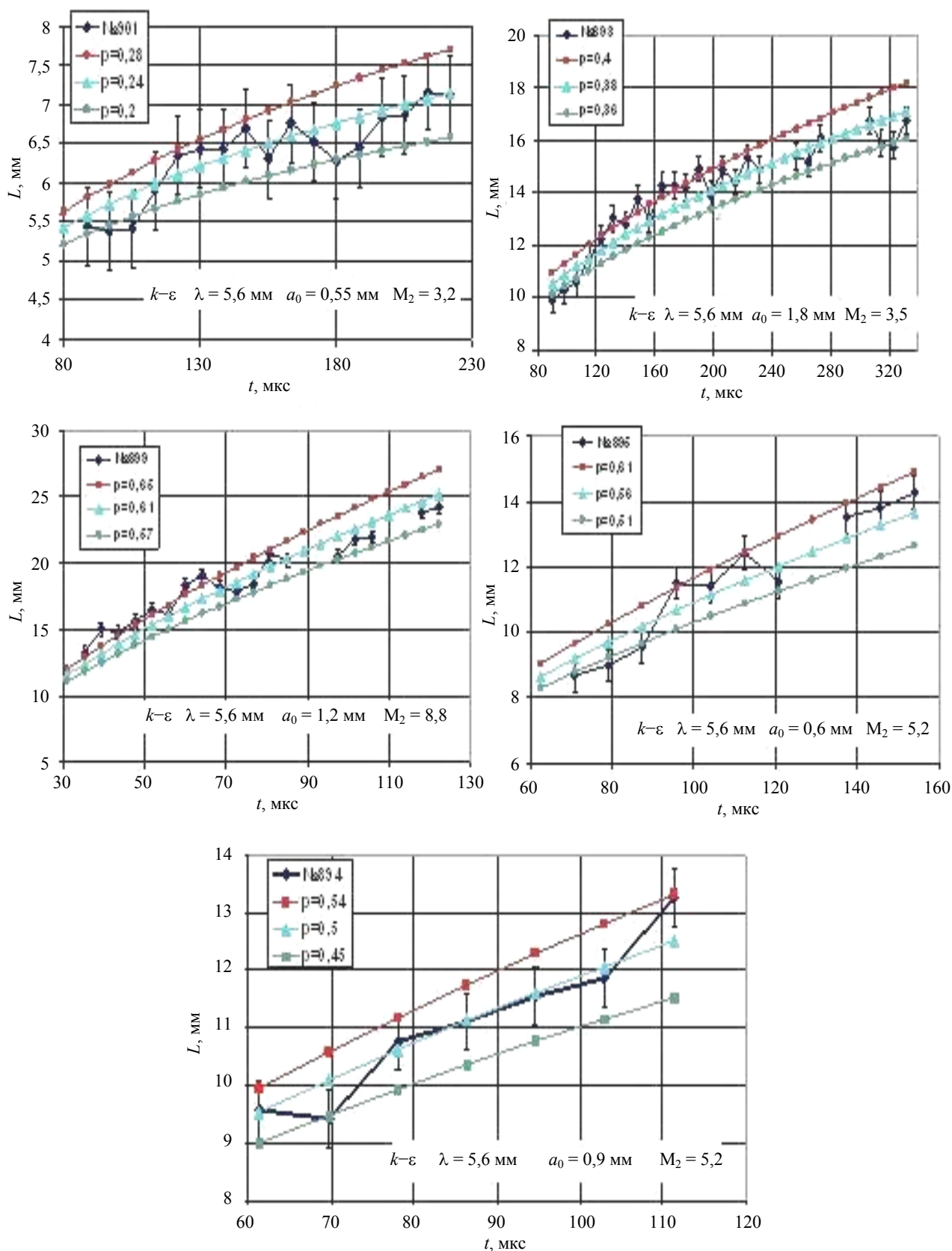


Рис. 7.  $L(t)$ -диаграммы опытов с SF<sub>6</sub>:  $p$  – расчетный показатель степени по  $k-\varepsilon$  модели;  $\text{---}$  – эксперимент

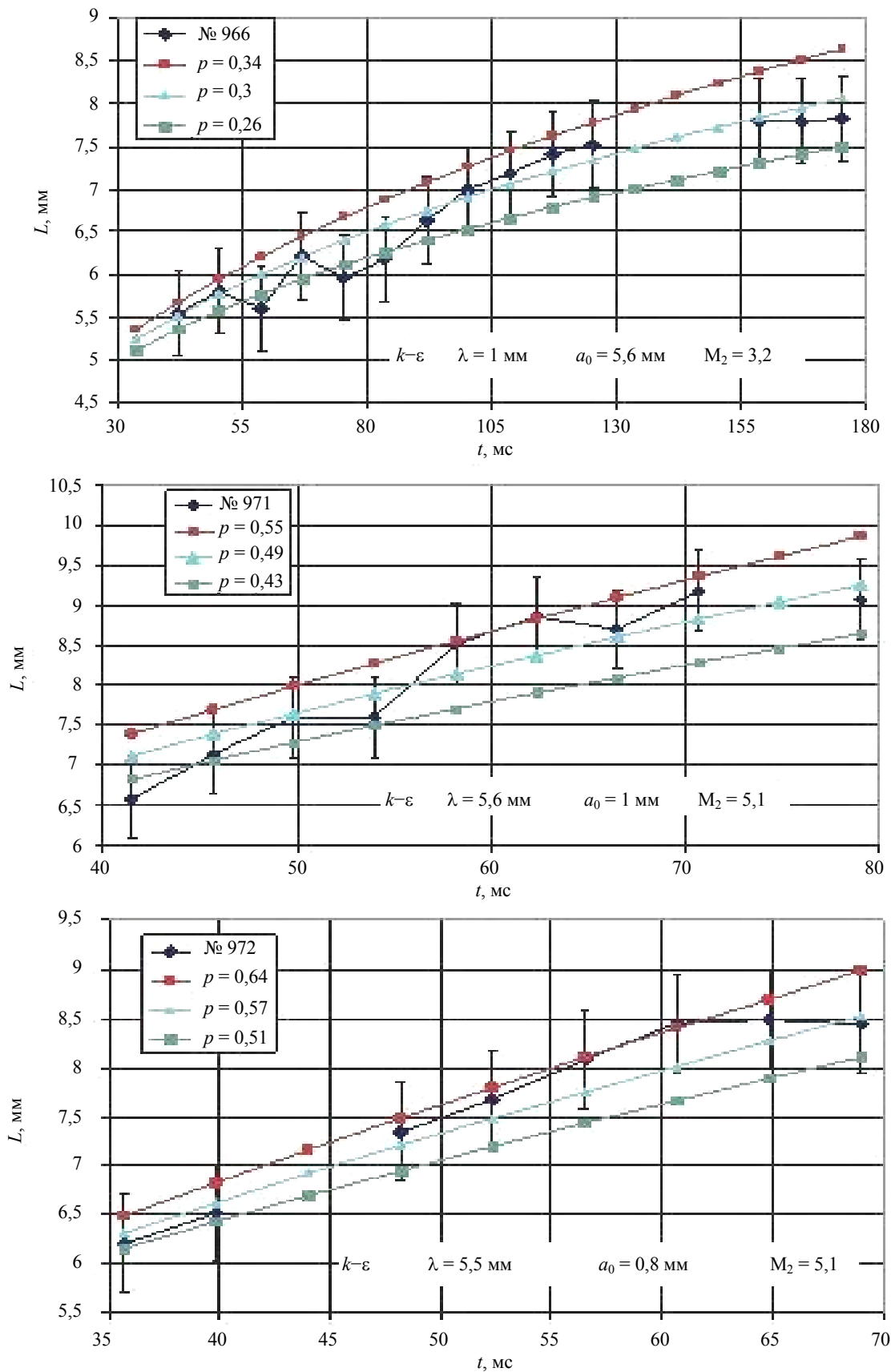


Рис. 8.  $L(t)$ -диаграммы опытов с CO<sub>2</sub>:  $p$  – расчетный показатель степени по  $k-\varepsilon$  модели;  $\pm$  – эксперимент

## Закключение

Таким образом результаты расчетов показывают, что с увеличением числа Маха ударной волны ширина зоны перемешивания и скорость ее роста увеличивается. Это увеличение может быть связано с более медленным затуханием турбулентности с повышением интенсивности ударной волны. Необходимо корректировка показателя степени  $P$  в  $k$ - $\epsilon$  модели по числу Маха УВ.

## Литература

1. Taylor G. I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc. Roy. Soc. 1950. Vol. A201. P. 192.
2. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. P. 297.
3. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв. АН СССР. МЖГ. 1969, № 5. P. 151–158.
4. Авраменко М. И. О  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности. Снежинск: Изд-во НАЗВ-ВНИИТФ, 2005.

5. Беленький С. З., Фрадкин Е. С. Теория турбулентного перемешивания // Труды ФИАН. Т. XXIX. 1965. С. 207–238.

6. Dimonte G. Nonlinear evolution of the Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities // Phys. of Plasmas. 1999. Vol. 6, N 5. P. 2009–2015.

7. Невмержицкий Н. В., Разин А. Н., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Кривонос О. Л., Точилина Л. В., Дудин В. И., Никулин А. А., Устиненко В. А. Исследование развития турбулентного перемешивания и возмущений в газах с повышенной сжимаемостью при числах Маха ударной волны от 2 до 9 // Доклад на 10 Международный семинар по физике турбулентного перемешивания сжимаемых сред. Франция. Париж. Июль 2006.

8. Власов Ю. А., Герасимов С. И., Губков Е. В., Дудин В. И., Копышев В. П., Мешков Е. Е., Никулин А. А., Рябов В. П., Тилькунов В. А. Ударная труба с ГВС-драйвером. Препринт 47–96. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.

9. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004.

10. Зубарев В. Н., Козлов А. Д., Кузнецов В. М. и др. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1989.



# РОЖДЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СТРАННЫЕ КВАРКИ, В $\Sigma^-$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

*В. В. Тарасов (от коллаборации SELEX)*

ФГУП «ГНЦ РФ – ИТЭФ», Москва

Физика частиц занимается изучением наиболее скрытых деталей строения материи. Изучение свойств таких частиц, механизмов их рождения и распада, играет ключевую роль в понимании многих процессов происходящих во Вселенной с момента Большого взрыва до настоящего времени. Теория, описывающая взаимодействия между этими частицами, называется Стандартной Моделью, а сами частицы, участвующие во взаимодействиях – адронами и лептонами.

Адроны, содержащие странные кварки, с одной стороны, еще недостаточно изучены. Систематика адронов в рамках Стандартной Модели предсказывает больше таких состояний, чем наблюдается в экспериментах. С другой стороны, странность является одним из сигналов кварк-глюонной плазмы и поэтому изменение характеристик состояний, включающих странные кварки, является актуальной задачей физики частиц.

В таблицах элементарных частиц, среди странных барионов, представлены 13  $\Lambda^*$ , 9  $\Sigma^*$  и 5  $\Xi^*$  резонансов, классифицируемых как известные (3 или 4 звезды) [1]. Так, например, из всех  $\Sigma^*$ -гиперонов почти все известные состояния с массой более 1385 МэВ/с<sup>2</sup> определялись только с помощью парциально-волнового анализа, с сильно различающимися оценками значений массы и ширины. К настоящему времени существуют лишь две работы по прямому наблюдению в спектре эффективных масс  $\Sigma^*$  с массами более 1385 МэВ/с<sup>2</sup> и  $\Lambda^*$  с массами более 1520 МэВ/с<sup>2</sup> – эксперимент WA89 в ЦЕРНе [2] и SPHINX в Протвино [3].

Коллаборация WA89 в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  в спектре эффективных масс системы  $pK^-$  наблюдала сигналы с массами 1520, 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> (рис. 1). Все эти сигналы были образованы в инклюзивной реакции на  $\Sigma^-$ -пучке с импульсом 340 ГэВ/с.

Вторая работа – работа коллаборации SPHINX на протонном пучке ускорителя У-70 ИФВЭ, где наблюдался сигнал  $\Lambda(1520)$ , а также сигналы с массами 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> в системе  $pK^-$  в реакции  $p + N \rightarrow p + K^- + K^+ + N$ .

Векторный  $\phi^0(1020)$ -мезон является хорошо изученным состоянием (в PDG представлено более 150 работ по наблюдению этого мезона со скрытой странностью). Менее известен тензорный  $2^+ f_2'(1525)$ -мезон, который, как и  $\phi^0(1020)$ -мезон, обладает скрытой странностью (кварковый состав  $s\bar{s}$ ), статистическая

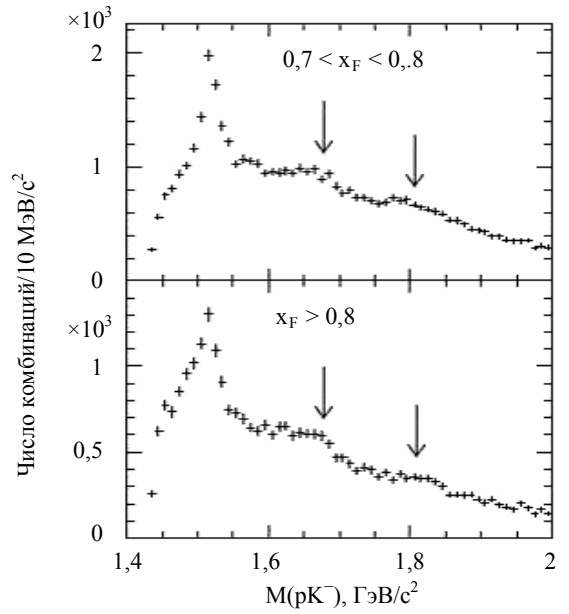


Рис. 1. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$ , где наблюдались состояния с массами 1520, 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup>, образующихся в инклюзивной реакции на  $\Sigma^-$ -пучке (эксперимент WA 89). Стрелками показаны положения сигналов в области 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup>

обеспеченность мировых данных по этому состоянию не так велика. Большинство мировых данных о мезоне  $f_2'(1525)$  получены на пучках, не содержащих странный кварк – в таких экспериментах рождение  $s\bar{s}$  состояний подавлено правилом Окубо-Цвейга-Иизуки (ОЦИ). Существует порядка 10 работ (преимущественно 70–80-х годов), где этот резонанс наблюдался на каонном пучке.

## Экспериментальная установка

Название SELEX является аббревиатурой от SEgmented Large  $X_F$  baryon spectrometer (или дословно: Многосекционный барионный спектрометр больших  $x_F$ ). Основной задачей эксперимента SELEX являлось изучение свойств барионов, содержащих s-кварки, образующихся при взаимодействии гиперонов с ядрами на ускорителе Тэватрон. Набор данных происходил в течение 1996–97 гг.

На рис. 2 представлена схема установки SELEX. В эксперименте SELEX пучок протонов с энергией

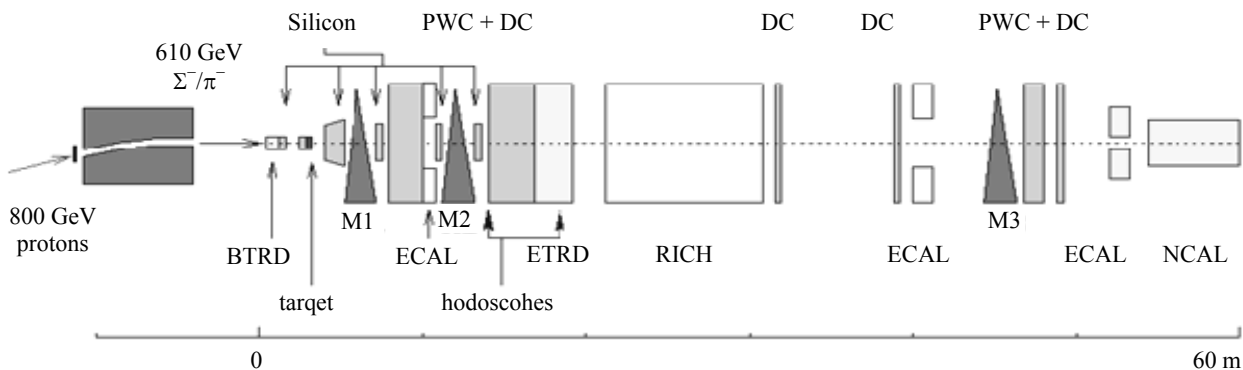


Рис. 2. Схема установки SELEX

800 ГэВ падал на бериллиевую мишень. Вылетающие вперед вторичные частицы направлялись в узкий изогнутый канал, высверленный в гиперонном магните. Поскольку относительная доля гиперонов во вторичном пучке растет с энергией, данные для анализа были набраны с использованием гиперонного пучка с энергией  $600 \pm 50$  ГэВ. В области мишени 600 ГэВ-й вторичный пучок состоял из приблизительно 50,9 %  $\pi^-$ ; 46,3 %  $\Sigma^-$ ; 1,6 %  $K^-$  и 1,2 %  $\Xi^-$ .

Три дипольных магнита делят установку SELEX на 5 независимых спектрометров, называемых пучковый, вершинный, M1, M2, M3 соответственно. По отклонению треков в магнитном поле определялся импульс частиц. Для определения треков частиц использовались пропорциональные проволочные камеры (Proportional Wire Chambers или PWC), кремниевые детекторы (Silicon Detectors или SD) и векторные дрейфовые камеры (Vector Drift Chambers или VDC). С помощью кольцевого черенковского детектора (Ring Imaging Cherenkov Detector или RICH) [4] и детекторов переходного излучения (Transition

Radiation Detectors или TRD) определялся тип частицы. Нейтральные частицы детектировались в электромагнитных калориметрах Фотон (PHOTON) и адронном калориметре (NCAL).

Как уже было сказано ранее, кольцевой черенковский детектор являлся одним из основных детекторов для идентификации заряженных частиц. В нем частицы проходили 10-метровый цилиндр, заполненный газом Ne. Поскольку релятивистские частицы двигались быстрее, чем скорость света в данной среде, они испускали черенковские фотоны, которые отражались от сферического зеркала и образовывали кольца на детектирующей поверхности (рис. 3).

В эксперименте SELEX черенковские фотоны отражались от зеркала с 20-метровым радиусом кривизны и фокусировались на массиве из 2848 ФЭУ-60 с диаметром рабочей области фотокатода 10 мм. RICH-детектор использовался для определения вероятности того, что данный трек является электроном, мюоном, пионом, каоном, протоном, гипероном или другой частицей.

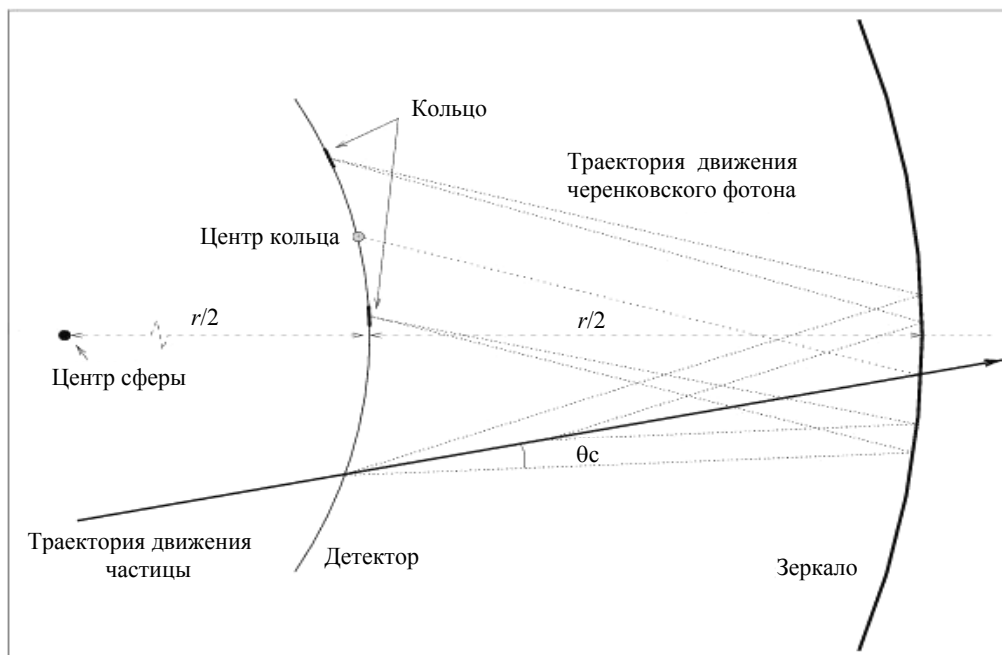


Рис. 3. Формирование колец на детектирующей поверхности RICH

## Физические результаты

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость радиуса кольца черенковского излучения от импульсов положительно заряженных частиц ( $\mu^+$ ,  $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Xi^+$ ,  $\Omega^+$ ). Из рисунка наглядно видно, что приемлемая идентификация частиц возможна до значения импульсов, где происходит слияние кривых (~300 ГэВ/с). Видна даже область импульсов, в которой возможно различить по черенковскому излучению мюоны и пионы. Для отрицательно заряженных частиц зависимость аналогичная.

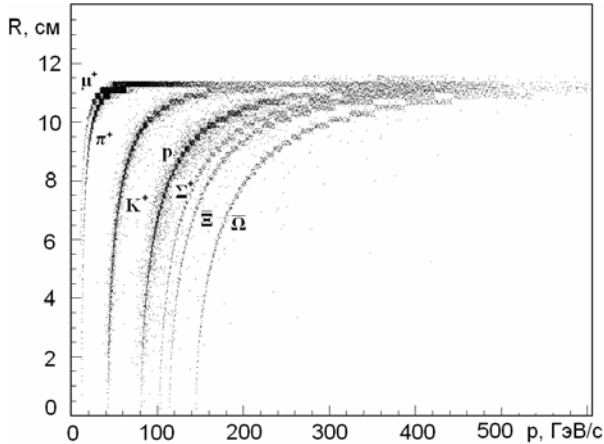


Рис. 4. Радиус колец в RICH для положительно заряженных частиц

На выборке данных (60 млн. триггерных событий из всего массива данных, порядка 1 млрд. событий) в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  на гиперонном пучке с импульсом 600 ГэВ/с идентифицировались протоны с импульсом от 80 до 220 ГэВ/с и заряженные каоны с импульсом от 40 до 160 ГэВ/с. Знак заряда и импульс частицы определялись по отклонению трека в магнитном поле. Отбор треков проходил в соответствии с сигналами в RICH-детекторе. Примесь  $\Sigma$ -гиперонов среди зарегистрированных протонов являлась незначительной, из-за того, что время жизни  $\Sigma$ -гиперонов существенно меньше времени жизни протонов (95,5 % всех  $\Sigma$ , вылетающих из мишени, распадаются до детектора RICH, при начальном значении импульса не более 600 ГэВ/с).

Отобрано 3593988 событий, содержащих протон и  $K^-$ -мезон, вылетающих из мишени. В спектре эффективных масс системы  $pK^-$  (рис. 5) отчетливо видны сигналы в области 1520, 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup>. При фитировании спектров использовалось разрешение установки  $\sigma(M)$ , полученное моделированием методом Монте-Карло для фиксированных значений эффективных масс при нулевой ширине резонансного состояния (рис. 6). Каждый сигнал в спектре эффективных масс для систем  $pK^-$  фитировался сверткой функций Гаусса и Брейта-Вигнера, фон описывался сложной функцией  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5} \exp(b + cx + dx^2)$ , где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – параметры. Для поиска систематических погрешностей фон фитировался следую-

щими функциями: 1)  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5}(b + cx + dx^2)$  и 2)  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5} \exp(b + cx + dx^2)^{-1}$ . Значение  $\chi^2$  на степень свободы в области 1450–2050 МэВ/с<sup>2</sup> составляет 360/84, а в области 1550–2050 МэВ/с<sup>2</sup> составляет 160/86. Как видно из рис. 5, критерий согласия в районе 1545–1555 МэВ/с<sup>2</sup> существенно больше чем 1. Это говорит о возможном существовании в этой области резонансного состояния.

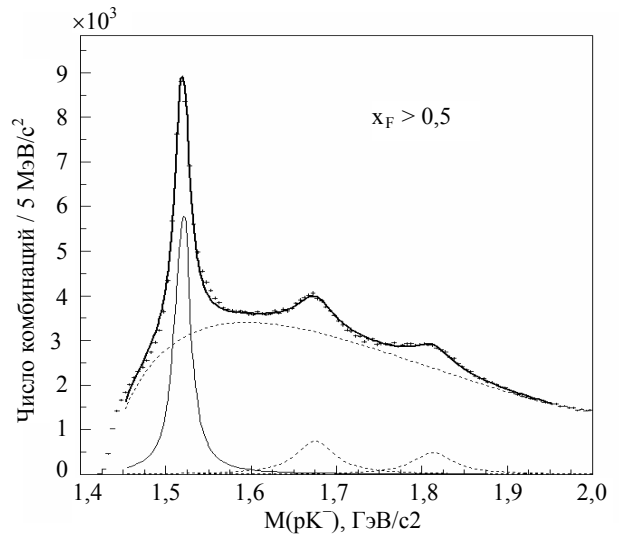


Рис. 5. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$  в диапазоне от 1,4 до 2,0 ГэВ/с<sup>2</sup> при значении  $x_F > 0,5$ . Пунктирными линиями показаны фон и резонансы по отдельности

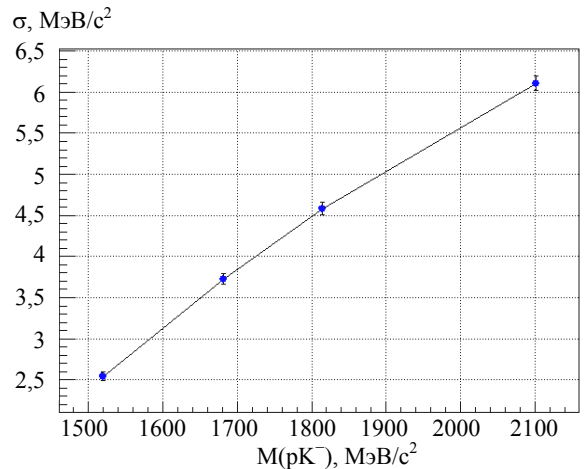


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  от эффективной массы системы  $pK^-$

Сигнал с массой 1520 МэВ/с<sup>2</sup> соответствует известному гиперонному состоянию  $\Lambda(1520)$ . Природа сигналов с массами 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup> не так очевидна. Превышение сигнала над фоном в резонансах:  $232570 \pm 803$  событий для состояния с массой 1520 МэВ/с<sup>2</sup>,  $42620 \pm 976$  – для состояния с массой 1670 МэВ/с<sup>2</sup> и  $36070 \pm 951$  – для состояния с массой 1820 МэВ/с<sup>2</sup>, что соответствует 206, 67 и 52 стандартным отклонениям соответственно. Статистическая обеспеченность сигналов не вызывает сомнений.

Исследована зависимость наблюдаемых сигналов в системе  $pK^-$  от фейнмановской переменной  $x_F$ . Оказалось, что при больших значениях  $x_F$  происходит от-

носительное увеличение сигналов над фоном. Этот эффект может быть связан с механизмом лидирования.

При значении  $0,6 < x_F < 0,7$  в спектре эффективных масс системы  $pK^-$  имеется указание на сигнал в области  $2100 \text{ МэВ}/c^2$  с массой  $2123 \pm 3 \text{ МэВ}/c^2$  и шириной  $13 \pm 9 \text{ МэВ}/c^2$  (рис. 7). Значение  $\chi^2 = 1$ , число событий в сигнале  $39 \pm 11$ . Статистическая обеспеченность этого сигнала составляет всего около четырех стандартных отклонений. Ближайшим кандидатом из таблицы элементарных частиц является  $\Sigma$  (2100) с шириной  $70 \pm 30 \text{ МэВ}/c^2$  и с самым низким статусом (\*).

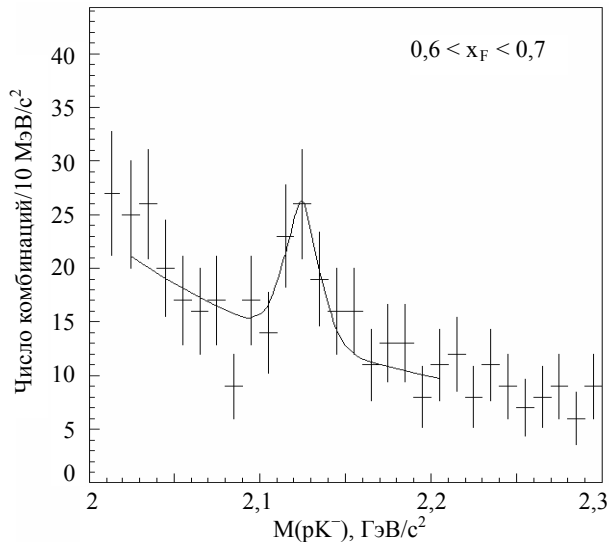


Рис. 7. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$  при значениях  $0,6 < x_F < 0,7$

Для определения изотопического спина наблюдаемых резонансов в системе  $pK^-$  в области  $1,67$  и  $1,82 \text{ ГэВ}/c^2$  был проведен анализ спектра эффективных масс системы  $pK_S^0$ . В данном спектре при различных значениях фейнмановской переменной  $x_F$  какие-либо значимые сигналы не обнаружены. Таким образом, наблюдаемые нами сигналы в спектре  $pK^-$  скорее всего соответствуют гиперонным состояниям с изотопическим спином 0.

Полученные характеристики гиперонов вместе с данными PDG приведены в таблице (указаны как статистические, так и систематические погрешности).

Таблица  
Результаты фитирования спектров  $pK^-$  и  $K^+K^-$

Адрон	$M_{PDG}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{PDG}, \text{ МэВ}/c^2$	$M_{\text{экс.}}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{\text{экс.}}, \text{ МэВ}/c^2$
$\Lambda(1520)$	$1519,5 \pm 1$	$15,6 \pm 1$	$1518,7 \pm 0,1 \pm 1,0$	$15,6 \pm 0,1 \pm 1,0$
$\Lambda(1670)$	$1660 \div 1680$	$25 \div 50$	$1672,9 \pm 0,8 \pm 1,0$	$56,6 \pm 1,6 \pm 3,0$
$\Lambda(1820)$	$1815 \div 1825$	$70 \div 90$	$1809,1 \pm 1,4 \pm 1,0$	$71,6 \pm 3,6 \pm 1,4$
$\Sigma(2100)$	$\approx 2100$	$70 \pm 30$	$2125 \pm 4$	$17 \pm 6$
$\phi^0(1020)$	$1019,460 \pm \pm 0,019$	$4,26 \pm 0,05$	$1019,9 \pm 0,1 \pm 0,4$	$4,32 \pm 0,09 \pm \pm 0,16$
$f_2'(1525)$	$1525 \pm 5$	$76 \pm 10$	$1522 \pm 1 \pm 2$	$84 \pm 2 \pm 3$

Определено отношение выходов гиперонных состояний  $\Lambda(1670)$  и  $\Lambda(1820)$  относительно  $\Lambda(1520)$  в канале распада на  $pK^-$ . Оно оказалось равным

$$\frac{\sigma_{1670} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)}{\sigma_{1520} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)} = (24,92 \pm 0,45 \pm 0,48) \%$$

$$\frac{\sigma_{1820} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)}{\sigma_{1520} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)} = (16,13 \pm 0,38 \pm 0,45) \%$$

где  $\sigma$  – эффективное сечение рождения;  $BR$  – вероятность распада по данному каналу.

Проведены исследования образования гиперонных состояний также и на протонном и пионном пучках. В спектре эффективных масс системы  $pK^-$  на протонном пучке отчетливо наблюдается сигнал  $\Lambda(1520)$ , сигналы с массами  $1670$  и  $1820 \text{ МэВ}/c^2$  имеют меньшую амплитуду по сравнению с сигналами, полученными на гиперонном пучке, так как в этом случае мы имеем другой механизм образования гиперонных состояний (вероятность рождения гиперонных состояний меньше, чем на  $\Sigma^-$ -пучке). На пионном пучке виден лишь сигнал в области  $1520 \text{ МэВ}/c^2$ .

В реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow K^+ + K^- + X$  исследованы резонансные состояния в спектрах эффективных масс системы  $K^+K^-$ . Как и в случае системы  $pK^-$ , для системы  $K^+K^-$  был проведен предварительный отбор событий.

На выборке данных системы  $K^+K^-$  (2,3 млн. триггерных событий из всего массива данных, порядка 1 млрд. событий) в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow K^+ + K^- + X$  на гиперонном пучке с импульсом  $600 \text{ ГэВ}/c$  идентифицировались положительно и отрицательно заряженные каоны с импульсом от  $40 \div 160 \text{ ГэВ}/c$ . Отбор треков проходил в соответствии с сигналами в RICH-детекторе.

Отобрано 2255544 событий, содержащих один отрицательный и один положительный  $K$ -мезоны.

Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$  представлен на рис. 8 и 9. В системе  $K^+K^-$  отчетливо видны сигналы в области  $1020$  и  $1525 \text{ МэВ}/c^2$ , которые однозначно можно идентифицировать как  $\phi^0(1020)$  и  $f_2'(1525)$ -мезоны, соответственно.

Фитирование проводилось аналогично описанному выше для системы  $pK^-$ . Как и в случае системы  $pK^-$  при фитировании спектра использовалось разрешение установки  $\sigma(M)$ , полученное моделированием методом Монте-Карло для фиксированных значений эффективных масс. Разрешение установки  $\sigma(M)$  для резонансного состояния с массой  $1020 \text{ МэВ}/c^2$  составляет  $1,6 \text{ МэВ}/c^2$ , для сигнала с массой  $1525 \text{ МэВ}/c^2$  –  $4,5 \text{ МэВ}/c^2$ . Значение  $\chi^2$  на степень свободы в области  $1 \text{ ГэВ}/c^2$  составляет  $80/43$ , в области  $1,5 \text{ ГэВ}/c^2$  –  $185/93$ . Сигнал от  $\phi^0(1020)$ -мезона отличается высоким значением отношения сигнал/фон и малой шириной; число событий в пике равно  $264973 \pm 3355$ . На рис. 8 и 9,б виден сигнал небольшой амплитуды от  $f_2'(1525)$ -мезона, содержащий  $28492 \pm 842$  событий. Статистическая обеспеченность резонансов составляет  $504$  и  $34$  стандартных отклонения для  $\phi^0(1020)$ -мезона и  $f_2'(1525)$ -мезона соответственно.

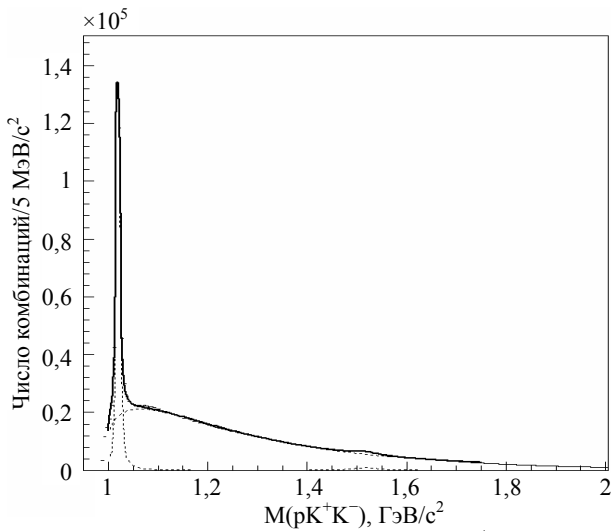
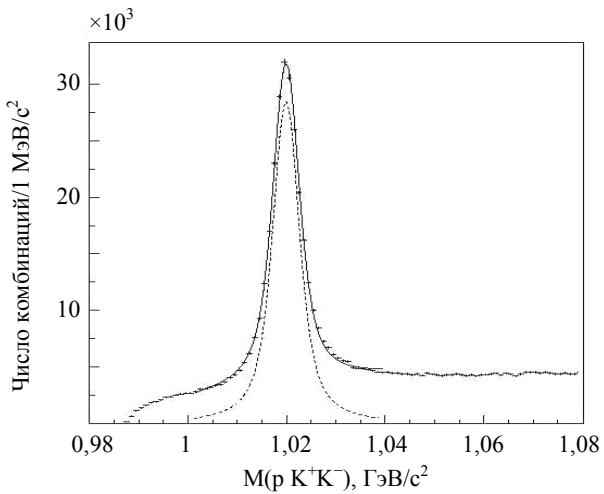
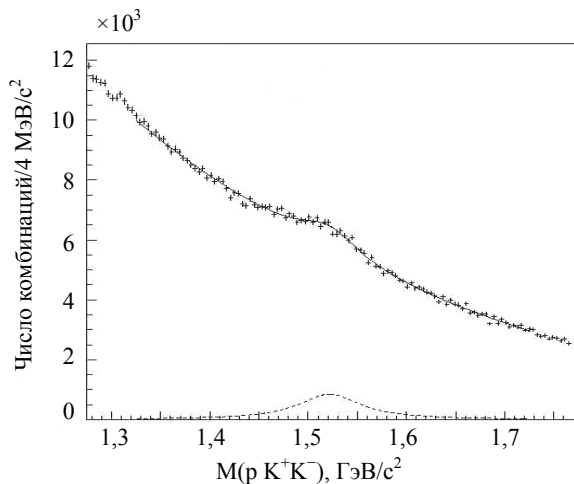


Рис. 8. Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$ . Сплошной линией показан результат фита, пунктирной – фон и резонансы по отдельности



а



б

Рис. 9. Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$  в области 1020 МэВ/с<sup>2</sup> (а) и 1525 МэВ/с<sup>2</sup> (б) (сплошной линией показан результат фита, пунктирной – резонансы в отсутствии фона)

Полученные характеристики мезонов со скрытой странностью вместе с данными PDG приведены в таблице (указаны как статистические, так и систематические погрешности).

Определено отношение выхода мезона  $f_2'(1525)$  относительно  $\phi^0(1020)$  в канале распада на  $K^+K^-$ . Оно оказалось равным

$$\frac{\sigma_{1525} \text{ЧBR}(f_2'(1525) \rightarrow K^+ K^-)}{\sigma_{1020} \text{ЧBR}(\phi^0(1020) \rightarrow K^+ K^-)} = (10,75 \pm 0,25 \pm 0,45) \%$$

Нами проведен поиск состояний в системе  $\bar{p}K^+$  на гиперонном, протонном и пионном пучках. Отчетливо виден сигнал  $\bar{\Lambda}(1520)$ . Сигналы в области 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup> сильно подавлены. Этот эффект может быть связан с периферическим (полусным) механизмом образования адронов.

## Выводы

Мы наблюдаем высоковозбужденные гиперонные состояния в реакциях  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  в области 1,52 ( $M = 1518,7 \pm 0,1 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 15,6 \pm 0,1 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>); 1,67 ( $M = 1672,9 \pm 0,8 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 56,6 \pm 1,6 \pm 3,0$  МэВ/с<sup>2</sup>) и 1,82 ( $M = 1809,1 \pm 1,4 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 71,6 \pm 3,6 \pm 1,4$  МэВ/с<sup>2</sup>). Сигнал вблизи 1,52 ГэВ/с<sup>2</sup> соответствует известному резонансу  $\Lambda(1520)$ . Сигналы вблизи 1,67 и 1,82 ГэВ/с<sup>2</sup> согласуются с результатами экспериментов SPHINX 2004 г. и WA89 2007 года. Наблюдаемые нами сигналы в спектре  $pK^-$  скорее всего соответствуют гиперонным состояниям с изотопическим спином 0. Впервые в спектре эффективных масс в системе  $pK^-$  обнаружен сигнал в области 2,1 ГэВ/с<sup>2</sup> ( $M = 2125 \pm 4$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 17 \pm 6$  МэВ/с<sup>2</sup>), который виден лишь при значении фейнмановской переменной  $0,6 < x_F < 0,7$ .

Измеренные параметры гиперонных состояний имеют наибольшую статистическую обеспеченность среди аналогичных экспериментальных данных, представленных в PDG.

Нами исследована зависимость наблюдаемых сигналов в системе  $pK^-$  от фейнмановской переменной  $x_F$ . Показано, что при больших значениях  $x_F$  происходит относительное увеличение сигналов над фоном. При малых значениях фейнмановской переменной  $x_F$  ( $x_F < 0,3$ ) сигнал вблизи 1520 МэВ/с<sup>2</sup> существенно уменьшается, а сигналы вблизи 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> не наблюдаются. Данное наблюдение полностью подтверждает эффект механизма лидирования и полюсного механизма образования адронов в сильных взаимодействиях.

Проведен поиск состояний в системе  $pK^-$  на протонном и пионном пучках, а также поиск античастиц в системе  $\bar{p}K^+$  на  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\Sigma^-$ -пучках. Амплитуда сигналов, наблюдаемых на гиперонном пучке, в данных условиях подавлена, что также наглядно под-

тверждает механизм полюсного образования адронов и механизм лидирования.

В системе  $K^+K^-$  наблюдались сигналы в области 1020 и 1525 МэВ/ $c^2$ . Сигнал вблизи 1,02 ГэВ/ $c^2$  ( $M = 1019,9 \pm 0,1 \pm 0,4$  МэВ/ $c^2$ ,  $\Gamma = 4,32 \pm 0,09 \pm 0,16$  МэВ/ $c^2$ ), соответствует  $\phi_0(1020)$ -мезону, а в области 1,525 ГэВ/ $c^2$  ( $M = 1522 \pm 1 \pm 2$  МэВ/ $c^2$ ,  $\Gamma = 84 \pm 2 \pm 3$  МэВ/ $c^2$ ), соответствует  $f_2'(1525)$ -мезону. Число событий в сигнале  $f_2'$  составляет около 29000 и это более чем на два порядка превышает существующие мировые данные по наблюдению в спектрах эффективных масс  $f_2'$ -мезона на пучках, содержащих странные кварки. Более того, статистическая обеспеченность резонанса  $f_2'$  превосходит абсолютно все другие экспериментальные

данные представленные в PDG как минимум на порядок.

## Литература

1. Nakamura K. et al. (Particle Data Group). J. Phys. G37, 075021, 2010.
2. WA89 Collaboration, Adamovich M. I., Alexandrov Yu. A., Baranov S. P. et al. // hep-ex/070244v1 27 Feb 2007.
3. SPHINX Collaboration, Antipov Yu. M., Artamonov A. V., Batarin V. A. et al. // Eur. Phys. J. A. 2004. Vol. 21. P. 455.
4. Engelfried J. et al. The RICH detector of the SELEX experiment. Nucl. Instrum. Meth. A 433. 149, 1999.

# ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В. В. Турутин, В. М. Мартынов, А. В. Козачёк, Д. П. Спирин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию импульсного сильноточного ускорителя электронов [1]. Одним из основных узлов ускорителя является генератор импульсных напряжений (ГИН) [2]. ГИН является первичным емкостным накопителем энергии. Высоковольтный стенд для испытаний, далее стенд, предназначен для проведения электрических испытаний ГИН с определением электропрочности его элементов, а также времени задержки его срабатывания [3]. Испытания ГИН являются неотъемлемой операцией перед вводом его в эксплуатацию.

Стенд используется для проверки:

- емкостных накопителей (конденсаторов) напряжением до 100 кВ;
- разрядников;
- высоковольтных кабелей.

## 1. Состав стенда

В состав стенда входят:

- источник высокого напряжения Zeichn M64-M;
- блок управления зарядкой;

- пульт управления стендом;
- БИНГ-5 (блочный импульсный наносекундный генератор);
- БИНГ-6 (блочный импульсный наносекундный генератор);
- нагрузка ГИН;
- модуль измерительный.

Вспомогательные системы, необходимые для эксплуатации стенда:

- система газоподготовки;
- система газонаполнения.

Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

### 1.1. Источник высокого напряжения Zeichn M64-M

Источник высокого напряжения (далее источник) предназначен для зарядки конденсаторов ГИН. Он разработан на основе источника высокого напряжения рентгеновской установки «ИРИС-3». Изначально источник высокого напряжения обладал пониженным выходным напряжением и поэтому был подвержен модернизации.

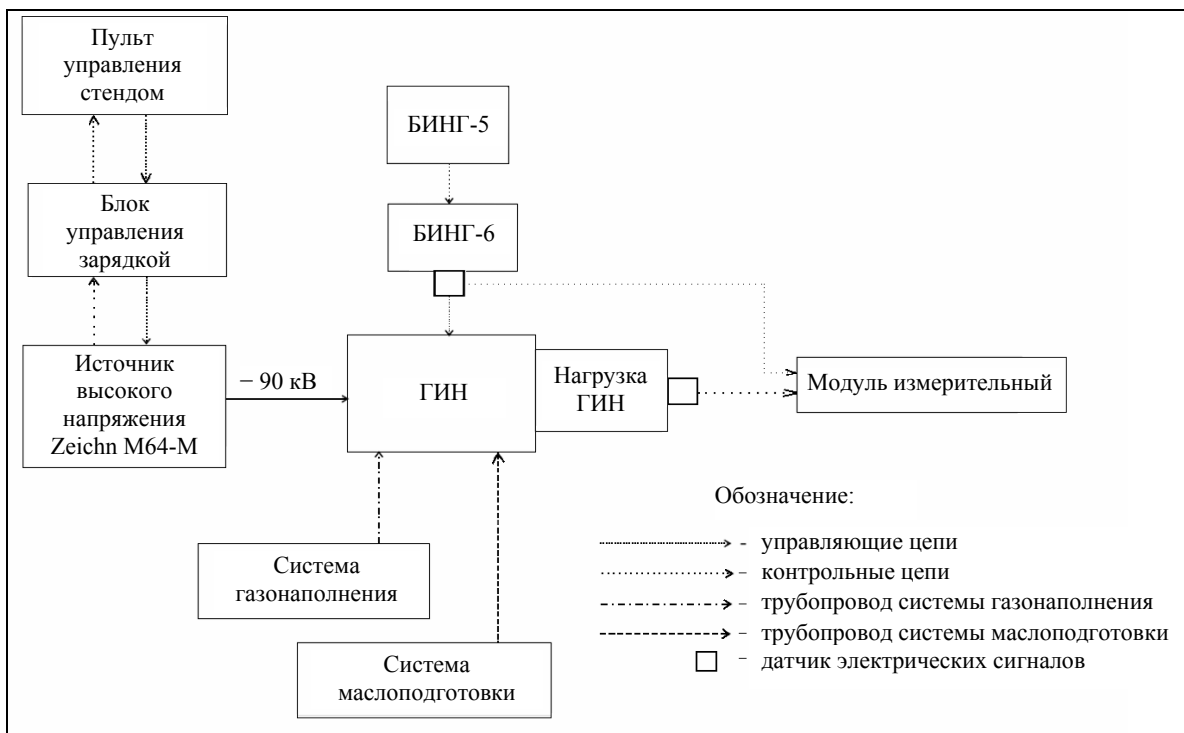


Рис. 1. Структурная схема стенда



В ходе модернизации были проведены следующие работы:

- заменены конденсаторы;
- изменена схема выпрямления;
- изменена схема коммутации и введен дополнительный разрядный резистор.

В результате модернизации выходное напряжение источника было повышено с 65 до 100 кВ.

Напряжение питания источника – от 0 до 220 В. Габаритные размеры источника – 810×480×600 мм<sup>3</sup>.

### 1.2. Блок управления зарядкой

Блок управления зарядкой (далее БУЗ) предназначен для управления источником. Напряжение питания БУЗ – 220 В. Габаритные размеры БУЗ – 300×280×200 мм<sup>3</sup>. Общий вид блока управления зарядкой представлен на рис. 2.

Структурная схема БУЗ представлена на рис. 3.



Рис. 2. БУЗ источника

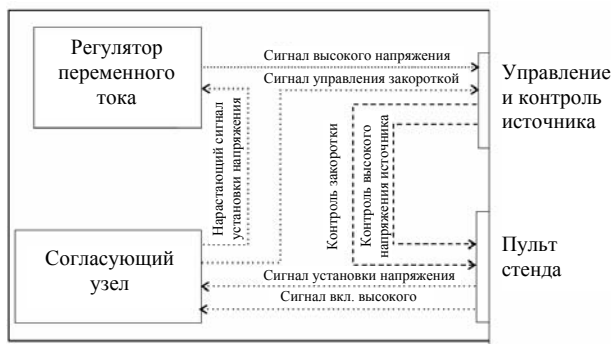


Рис. 3. Структурная схема БУЗ: —> – управляющие сигналы; - - -> – контрольные сигналы

В состав БУЗ входят:

- согласующий узел;
- регулятор переменного тока (далее РОТ).

Согласующий узел предназначен для коммутации зарядной цепи источника и обеспечивает плавную подачу управляющего сигнала (уставки напряжения) на РОТ при разрешающем сигнале (вкл. Вы-

сокого) с пульта управления. Под действие нарастающего сигнала (уставки напряжения) с согласующего узла РОТ обеспечивает подачу напряжения (0–220 В) на трансформатор источника, тем самым, поднимая высокое напряжение на конденсаторах ГИН. Время роста напряжения на входе РОТ регулируется согласующим узлом.

### 1.3. Пульт управления стендом

Пульт управления стендом выполняет следующие функции:

- уставку напряжения зарядки конденсаторов ГИН;
- разрешения подачи высокого напряжения на конденсаторы ГИН;
- включения/отключения источника;
- контроль выходного напряжения источника;
- контроль состояния закоротки зарядной цепи;
- экстренного сброса напряжения зарядки ГИН на разрядный резистор источника.

Пульт управления стенда является дистанционным.

Общий вид пульта управления стендом представлен на рис. 4.



Рис. 4. Пульт управления стендом

На лицевой панели пульта управления стендом расположены следующие элементы:

- переключатель с ключом на два направления («РАБОТА РАЗРЕШЕНА»). При повороте ключа в положение «ВКЛ.» – подача напряжения на конденсаторах ГИН разрешена, при этом светодиодная лампа «РАБОТА РАЗРЕШЕНА» горит желтым цветом. При повороте ключа в положение «ВЫКЛ.» подача напряжения на конденсаторах ГИН запрещена, при этом светодиодная лампа «РАБОТА РАЗРЕШЕНА» не горит;

– поворотные переключатели «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, кВ». Левым поворотным переключателем задается значение выходного напряжения на источнике (десятки кВ), правым – значение выходного напряжения на источнике (единицы кВ). Допускается поворотными переключателями в процессе проведения зарядки конденсаторов ГИН корректировать текущее значение зарядного напряжения;

– кнопка «ВКЛ. HV». При нажатии на кнопку «ВКЛ. HV» на конденсаторы подается высокое напряжение, при этом светодиодная лампа «HV ВКЛ.» горит красным цветом, светодиодная лампа «HV РАЗРЕШЕНО» горит зеленым цветом;

– светодиодный дисплей «НАПРЯЖЕНИЕ, кВ» цифрового вольтметра. Горящие цифры на дисплее отображают текущее значение напряжения зарядки конденсаторов ГИН;

– кнопка «ВЫКЛ. HV». При нажатии на кнопку «ВЫКЛ. HV» прекращается зарядка конденсаторов ГИН, при этом светодиодные лампы «HV ВКЛ.» и «HV РАЗРЕШЕНО» гаснут, значение напряжения зарядки на светодиодном дисплее «НАПРЯЖЕНИЕ, кВ» обнуляется. Допускается кнопкой «ВЫКЛ. HV» осуществлять экстренный сброс электрической энергии, накопленной на конденсаторах ГИН;

– светодиодная лампа «РАБОТА РАЗРЕШЕНА». Горит желтым цветом – ключ «РАБОТА РАЗРЕШЕНА» в положение «ВКЛ.». Не горит – ключ «РАБОТА РАЗРЕШЕНА» в положение «ВЫКЛ.»;

– светодиодная лампа «HV ВКЛ.». Горит красным цветом – кнопка «ВКЛ. HV» нажата. Не горит – кнопка «ВКЛ. HV» отжата;

– светодиодная лампа «HV РАЗРЕШЕНО». Горит зеленым цветом – кнопка «ВКЛ. HV» нажата. Не горит – кнопка «ВКЛ. HV» отжата.

#### 1.4. БИНГ-5

Блочный импульсный наносекундный генератор БИНГ-5 формирует в кабельной нагрузке импульс напряжения положительной полярности с амплитудой 9,5 кВ и длительностью фронта ~5 нс. Используется на стенде в качестве стартового генератора.

#### 1.5. БИНГ-6

Блочный импульсный наносекундный генератор БИНГ-6 формирует импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой 56 кВ и длительностью фронта 8 нс. Импульсы напряжения от генератора БИНГ-6 по двум кабельным линиям КВИ-120 подаются на запуск разрядников ГИН.

#### 1.6. Нагрузка ГИН

Нагрузка ГИН предназначена для диссипации запасенной в конденсаторах ГИН энергии и измерения выходных параметров ГИН. Нагрузка ГИН представляет собой электролитический резистор с сопротивлением 3 Ом. Нагрузка закреплена в выходном узле ГИН.

#### 1.7. Система маслоподготовки

Система маслоподготовки при работе стенда используется для:

- заполнения маслом рабочих объемов ГИН;
- сушки и очистки масла от механических примесей в рабочих объемах ГИН;
- слива масла из рабочих объемов ГИН.

#### 1.8. Система газонаполнения

Система газонаполнения предназначена для заполнения газовой смесью 40 % SF<sub>6</sub> + 60 % N<sub>2</sub> разрядников ГИН.

#### 2. Работа стенда

Стенд представляет собой электротехническое устройство, предназначенное для проведения электрических испытаний ГИН.

После сборки к ГИН подсоединяются трубопроводы системы маслоподготовки и системы газонаполнения, а так же пусковые, сигнальные и зарядные кабели.

Рабочий объем ГИН заполняется трансформаторным маслом с электропрочностью не менее 60 кВ на стандартный зазор 2,5 мм.

Разрядники ГИН заполняются газовой смесью 40 % SF<sub>6</sub> + 60 % N<sub>2</sub> до давления 8 ати. Заполнение газовой смесью разрядников ГИН осуществляется с пульта системы газонаполнения.

Зарядка конденсаторов ГИН до напряжения – 90 кВ (ток зарядки не более 20 мА) осуществляется от источника по команде с пульта управления стендом через блок управления зарядкой. Сброс электрической энергии, накопленной в конденсаторах ГИН, (при возникновении неисправностей и аварийных ситуациях) осуществляется на разрядный резистор источника.

Для проверки электропрочности элементов ГИН необходимо провести статическую зарядку конденсаторов ГИН до напряжения 90 кВ с пульта управления стендом, выдерживать ГИН под напряжением в течение 10 с и сбросить энергию, накопленную в конденсаторах, на разрядный резистор источника.

Для измерения электрических параметров ГИН необходимо провести зарядку конденсаторов ГИН до требуемого напряжения с пульта управления стендом. Одновременно провести зарядку генераторов БИНГ-5 и БИНГ-6. При достижении заданных значений напряжений зарядки провести пуск генератора БИНГ-5.

Запуск разрядников ГИН осуществляется от генератора БИНГ-6.

Регистрация электрических сигналов осуществляется измерительным модулем с датчиков регистрируемых сигналов, установленных на пусковом кабеле разрядников ГИН, с последующей их обработкой и сохранением в базе данных.

Сохранённые данные эксперимента сравниваются с эталонными параметрами ГИН и в зависимости от результата делаются выводы о работоспособности ГИН.

## Заключение

Разработан, изготовлен и введен в опытную эксплуатацию высоковольтный стенд для проведения электрических испытаний генераторов импульсных напряжений. Стенд был спроектирован как универсальное устройство, позволяющее проводить эксперименты с емкостными накопителями энергии при зарядном напряжении до 100 кВ. Также следует отметить безопасность проведения экспериментов, так как электрические части стенда и сам ГИН отделены от персонала, проводящего эксперимент.

## Литература

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Назаренко С. Т., Грунин А. В., Мусин И. З., Гришин А. В., Мысков Г. А., Иванов И. А.,

Балакин В. А., Мартынов В. М., Лазарев С. А., Михайлов Е. С., Павлов В. С., Путевской С. А., Деманов В. А., Сусяков С. А., Калинычев А. Е., Глушков С. Л., Моисеевских М. А., Козачек А. В. Состояние работ по созданию ускорителя с энергией электронов ~2 МэВ, током пучка ~1 МА в импульсе длительностью ~60 нс / VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. 11–24 марта 2006 г.: Сборник докладов. Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2006. С. 145–149.

2. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В. Проект сильноточного ускорителя электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Вып. 3. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. С. 176–183.

3. Пунин В. Т. Комплексы РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе мощных линейных ускорителей электронов и импульсных ядерных реакторов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2003, № 1. С. 13–17.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ «ГАММА-1»

Д. С. Фарафонов, Д. С. Губин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В импульсных высокопоточных ускорителях электронов особое место занимает изолятор, разделяющий вакуумированный объем и объем, заполненный жидким диэлектриком. Этот узел должен соответствовать нескольким критериям по электрической прочности, наиболее существенным из которых является критерий пробоя по поверхности твердого диэлектрика в вакууме.

Как правило, изолятор состоит из нескольких диэлектрических секций, разделенных металлическими электродами – градиентными кольцами. Для таких изоляторов электрическая прочность при заданном рабочем напряжении определяется в основном равномерностью распределения разности потенциалов между градиентными электродами, и, соответственно, напряженности электрического поля в секциях изолятора.

Рассмотрению узла разделительного изолятора посвящен ряд работ. В частности, в работах [1, 2] рассмотрены изоляторы ускорителей Supermite и INER. Эти изоляторы с распределениями потенциалов в них представлены на рис. 1,а,б. Подходы, примененные в данных работах к разработке конструкции ускорительной трубки, в общих чертах схожи. Из них следует, что равномерное распределение по-

тенциалов по изолятору затруднено, если не использовать дополнительные элементы конструкции. Такими элементами могут быть диэлектрические линзы либо дополнительные электроды. Применение линз позволяет добиться более равномерного распределения потенциалов. На рис. 2 приведены распределения потенциалов по изоляторам ускорителей Supermite и INER при использовании диэлектрических линз.

В установке, обеспечивающей большие импульсные токи, узел секционированного изолятора не должен существенно ограничивать скорость нарастания тока, то есть его эквивалентная индуктивность должна быть минимальной. Вследствие этого требование равномерности распределения потенциалов усиливается.

В одном из исследованных вариантов ускорительной трубки ускорителя «Гамма-1» [3], с диаметром корпуса 650 мм, для выравнивания распределения потенциалов были использованы и диэлектрической линзы, и проводящие экраны. Изолятор был рассчитан на импульс напряжения амплитудой 2,5 МВ длительностью 60 нс на полувысоте, поступающий к трубке по водяной передающей линии с волновым сопротивлением 2,9 Ом. Испытания узла ускорительной трубки показали, что при данном импульсе происходят пробои по изоляторам и диэлектрическим

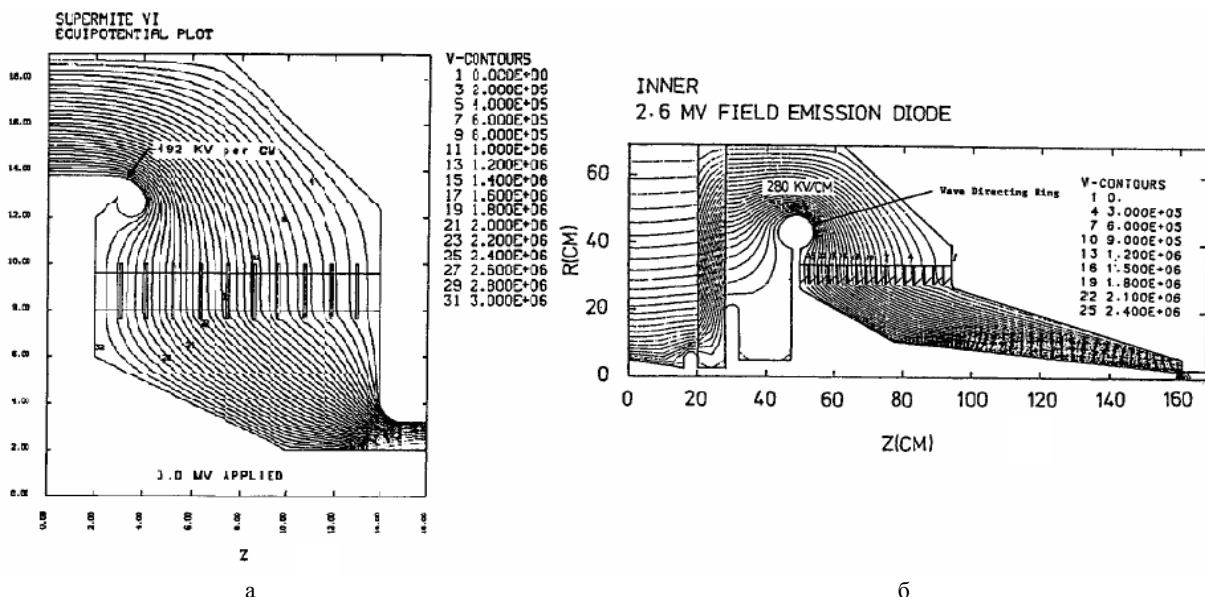
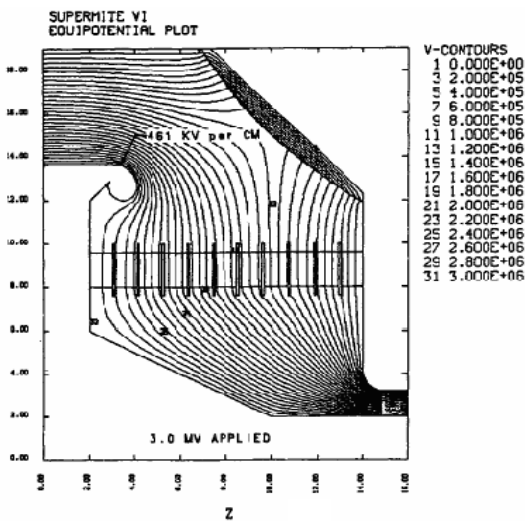
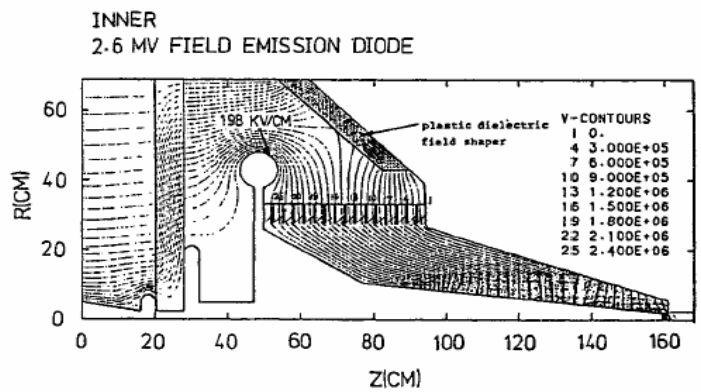


Рис. 1. Распределение потенциалов в изоляторах установок: а – Supermite; б – INER



a



б

Рис. 2. Распределение потенциалов при использовании диэлектрических линз в установках: а – Supermite; б – INER

ким линзам. Исследованный вариант изолятора был признан неработоспособным, и было принято решение увеличить диаметр водяной передающей линии и, соответственно, разработать новую конструкцию ускорительной трубки с учетом требования электрической прочности и с минимальной эквивалентной индуктивностью.

Целью данной работы является обоснование работоспособности разрабатываемой ускорительной трубки при помощи компьютерного моделирования.

### Критерии работоспособности и варианты конструкции трубки

Ускорительная трубка может быть признана работоспособной, если она обладает достаточным запасом электрической прочности, который, в свою очередь, определяется, исходя из свойств материалов трубки и распределения электрического поля в ней. Наиболее часто это распределение получают в электростатическом приближении. Данное приближение справедливо при сравнительно больших временах, начиная от сотен наносекунд, но при меньших временах использование статического приближения приводит к ошибке. Причина этой ошибки понятна, если рассмотреть дифференциальные уравнения, соответствующие электростатическому случаю и динамике: это, соответственно, уравнение Лапласа  $\Delta U = 0$  и система уравнений для скалярного и векторного потенциала, эквивалентная уравнениям Максвелла

$$DU - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \nabla^2 U = 0; \quad DA - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \nabla^2 A = 0.$$

Уравнение для скалярных потенциалов переходит в уравнение Лапласа при бесконечной скорости распространения электромагнитных волн  $c$ , так что электростатическое приближение может быть спра-

ведливо для достаточно длительных импульсов (сотни наносекунд), но не для нашего случая.

Возможности вычислительной техники позволяют исследовать объект, такой как ускорительная трубка, в динамике, при помощи уравнений Максвелла. Учет более сложных эффектов, таких, как электронная эмиссия и нелинейности в диэлектрике требует, тем не менее, слишком больших вычислительных ресурсов для достижения приемлемой точности. Динамическая модель, не учитывающая этих эффектов, будет менее адекватной, но все же ближе к реальному объекту, чем электростатическая модель.

Рассмотрим трубку, используемую в ускорителе «Гамма-1», с диаметром корпуса 1618 мм (рис. 3). Трубка хорошо себя зарекомендовала, что послужило одной из причин, по которой она была принята за

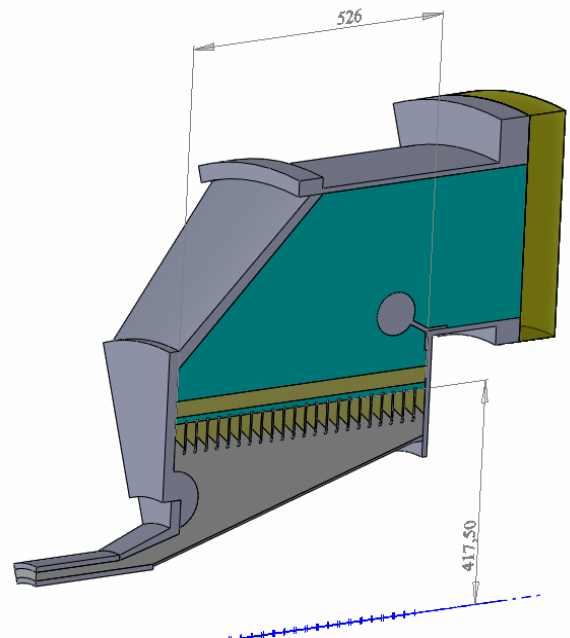


Рис. 3. Ускорительная трубка с диаметром водяной передающей линии 1618 мм

основу конструкции новой трубки. Если при эксплуатации ускорительной трубки не были зафиксированы пробой в изоляторе, то, зная значение напряжённости в секциях изолятора данной трубки, мы можем судить об электрической прочности другой трубки по напряженности в ее изоляторе. Распределение средней напряженности электрического поля, полученное при помощи программы WEC [4], приведено на рис. 4. В качестве входного импульса здесь и далее использовался выходной импульс с формирующей системы ускорителя «Гамма-1» с приведенными выше параметрами.

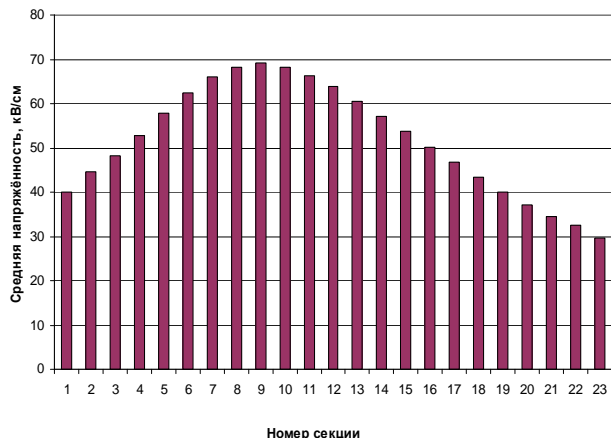


Рис. 4. Распределение средней напряженности электрического поля в трубке диаметром 1618 мм

Поскольку рассматриваемая трубка, очевидно, относится к такому же типу трубок, как и приведенные на рис. 1, то она обладает теми же недостатками. Одним из них является трудность создания равномерного распределения электрического поля по изолятору, что демонстрируют рис. 1 и 4.

Способы улучшения равномерности распределения уже рассмотрены выше: диэлектрические линзы и проводящие экраны. Из работ [1, 2] следует, что при применении линз цель может быть достигнута, но необходимо правильно выбрать форму линзы.

Конструкция разрабатываемой ускорительной трубки, работоспособность которой нам необходимо обосновать, показана на рис. 5. Она имеет разборный изолятор, скрепленный диэлектрическими шпильками в количестве 24 штук. Изолятор состоит из 21 секции, но имеется возможность варьировать его длину. В отличие от ранее рассмотренной трубки с диаметром 1618 мм, предусмотрена возможность установки диэлектрической линзы. Было рассчитано несколько вариантов линзы, из которых было выбрано два.

Рассмотрим базовый вариант ускорительной трубки с изолятором, состоящим из 21 секции. Нормированное (при напряжении на изоляторе 1 В) распределение средней напряженности электрического поля в секциях изолятора без диэлектрической линзы представлено на рис. 6. В модели этого варианта нет диэлектрических шпилек и линзы, а форма секций изолятора упрощена. В этой и в других моделях, которые будут рассмотрены ниже, величина нагрузки

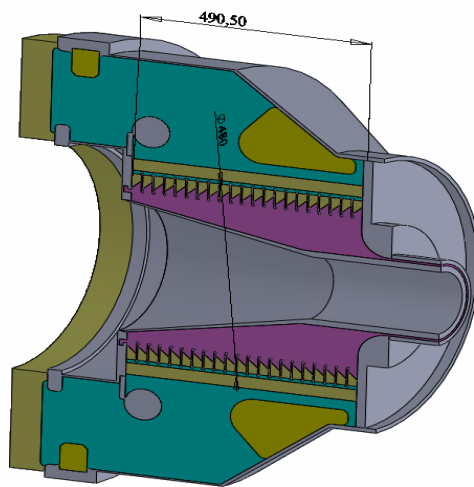


Рис. 5. Проект ускорительной трубки

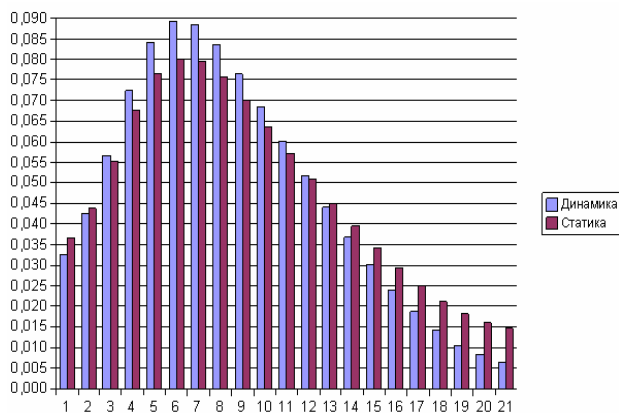


Рис. 6. Нормированное распределение средней напряженности в изоляторе без диэлектрической линзы

близка к согласованной. При использовании этой же модели было исследовано влияние диэлектрической линзы на распределение напряженности. Полученные средние напряженности с диэлектрической линзой в сравнении с напряженностями, полученными при отсутствии линзы, приведены на рис. 7. Очевидно, при использовании линзы разрыв между максимальной и средней напряженностью значительно меньше, чем при ее отсутствии, и, следовательно, электрическая прочность изолятора выше.

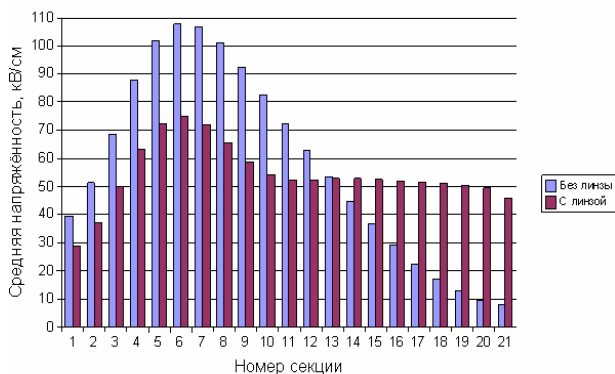


Рис. 7. Средняя напряженность в секциях изолятора при наличии и отсутствии линзы



Имеющейся двумерной модели недостаточно для проверки таких эффектов, как влияние диэлектрических шпилек. При помощи программы WEC нельзя получить значение напряженности на охранный электроре и оценить электрическую прочность линзы. В связи с этим была построена трехмерная модель.

При помощи модели получено распределение напряженности в ускорительной трубке. Напряженность поля в нескольких секциях изолятора такова, что при импульсном напряжении 2,5 МВ велика вероятность пробоя.

При наличии же диэлектрической линзы напряженность поля в секциях значительно ниже (примерно на 25 %), так что и вероятность пробоя снижена. Максимальная напряженность в диэлектрической линзе составляет около 150 кВ/см, средняя – около 110 кВ/см.

Таким образом, вариант ускорительной трубки с линзой, согласно вычислениям, обладает большей электрической прочностью, чем без линзы. Значение максимальной средней напряженности в секции изолятора позволяет утверждать, что вероятность безаварийной работы трубки с линзой высока.

Электрическая прочность не является единственным критерием, по которому следует оценивать работоспособность ускорительной трубки. Необходимо, чтобы она позволяла обеспечивать высокий уровень мощности на нагрузке. При помощи трехмерной модели была получена форма импульса на нагрузке, представляющей собой вакуумную линию с волновым сопротивлением 2,9 Ом, в которой отсутствует эмиссия электронов. Выходные импульсы для трубки диаметром 1618 мм и трех разновидностей разрабатываемой трубки представлены на рис. 8.

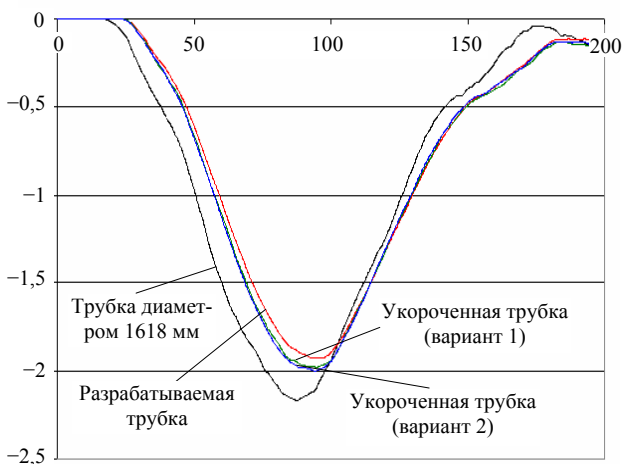


Рис. 8. Выходные сигналы с ускорительных трубок, полученные на нагрузке величиной 2,9 Ом для зарядного напряжения ускорителя 1 МВ

В своем базовом варианте новая трубка уступает трубке диаметром 1618 мм и по энергии, и по мощности: пиковая мощность на нагрузке у новой трубки составляет 1,28 ТВт, у существующей – 1,62 ТВт, в случае укороченных трубок мощность в нагрузке около 1,35 ТВт.

Более точное значение мощности, передаваемой в нагрузку, можно получить, если учитывать явление магнитной самоизоляции. Но в настоящее время конфигурация магнитноизолированной передающей линии окончательно не определена, и расчеты нами не проводились.

## Заключение

Проведенные расчеты электрической прочности секционированного изолятора проектируемой ускорительной трубки позволили сделать вывод о необходимости использования в ее конструкции диэлектрической линзы. При отсутствии линзы в нескольких секциях изолятора напряженность поля достигает 110 кВ/см, что может приводить к электрическому пробую. Также показано, что по сравнению с ускорительной трубкой диаметром 1,6 м эквивалентная индуктивность трубки выше, что приводит к некоторому снижению мощности, передаваемой в нагрузку.

## Литература

1. Moore W. B., Stinnett R. W., McDaniel D. H. Supermite Vacuum Interface Design / 5<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1985.
2. Hwang C. S. A New Vacuum Interface Design of INER High Current Pulsed Electron Beam Generators / 6<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1987.
3. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф., Гордеев В. С. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // XII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010.
4. Гордеев В. С., Михайлов Е. С. Программа WEC для расчета систем формирования импульсов ускоряющего напряжения на линиях с распределенными параметрами // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып. 3. С. 160–165.



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ НАСЫЩЕНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ АМОРФНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА 2НСР

Д. С. Фарафонов, Б. П. Мироньчев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Аморфные ферромагнитные сплавы в настоящее время широко используются в импульсной технике. Важнейшим свойством этих сплавов является высокое значение магнитной индукции насыщения, благодаря чему стало возможно развитие ускорителей – индукционных сумматоров напряжения [1]. Магнитные коммутаторы, использующие нелинейные свойства ферромагнитных материалов, также получили распространение главным образом благодаря появлению аморфных сплавов.

Целью данной работы является измерение индукции насыщения сердечников, изготовленных из аморфного сплава, при малой длительности импульса напряжения. Последнее особенно важно, потому что свойства этих материалов в области малых и больших времен значительно различаются. Подобным измерениям посвящено достаточно много работ [2, 3]. Методика измерения индукции насыщения, описанная в этих работах, такова: образец аморфного сплава играет роль сердечника нелинейной индуктивности, которая подвергается воздействию импульса напряжения малой длительности. Основной характеристикой сердечника является кривая намагничивания, по которой можно судить о размахе индукции и величине потерь в нем. Импульс напряжения может генерироваться внешним источником, например формирующей линией, либо же он формируется в результате переходного процесса в колебательном контуре, частью которого является нелинейная индуктивность.

В работе проводились измерения индукции насыщения образцов – сердечников из аморфной ленты, изготовленной из сплава 2НСР. Размер этих образцов достаточно небольшой (внешний диаметр 22 мм, внутренний – 15 мм, ширина – 5,2 мм), вследствие чего, с одной стороны, требуется сравнительно невысокое напряжение, а с другой приводит к некоторым неудобствам измерений.

## Описание экспериментальной установки

Пусть нелинейная индуктивность подключена к источнику напряжения, причем последнее изменяется по закону  $U(t)$ . Тогда магнитная индукция в сердечнике определяется из соотношения, известного как «вольт-секундный интеграл»:

$$B(t) = \frac{1}{S} \int_0^t U(\tau) d\tau + B_0, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника;  $B(t)$  – магнитная индукция;  $B_0$  – магнитная индукция до приложения напряжения. Если на индуктивность подается прямоугольный импульс напряжения с длительностью  $T$ , то из выражения (1) можно получить напряжение, требуемое для достижения заданной магнитной индукции. Из ряда работ и по данным производителей известно, что индукция насыщения для сплава 2НСР составляет порядка 1,6 Тл. Важно отметить, что сердечники не полностью состоят из ферромагнитного материала. Из-за того, что этот материал обладает достаточно высокой проводимостью, для уменьшения потерь сердечники выполнены из тонкой ленты с изоляцией между слоями.

Для эксперимента была выбрана схема, основанная на колебательном разряде конденсатора через нелинейную индуктивность (рис. 1).

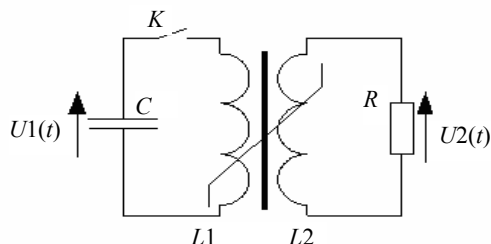


Рис. 1. Эквивалентная схема стенда

Конденсатор, разряжаясь, формирует на обмотке  $L1$  трансформатора импульс напряжения  $U1(t)$ , вторичная (измерительная) обмотка  $L2$  нагружена на сопротивление  $R$ . Если сопротивление достаточно велико, то режим работы трансформатора близок к режиму холостого хода, и значит  $U2(t) \approx U1(t)$ . Тогда, после измерения  $U2(t)$ , мы можем найти значение магнитной индукции, произведя интегрирование согласно (1).

Выбранная схема выгодно отличается от генератора на длинных линиях своей компактностью, но импульс напряжения в такой схеме уже не будет прямоугольным. Но, как установлено в эксперименте, при достаточно больших значениях емкости конденсатора и зарядного напряжения форма импульса приближается к прямоугольной. В этом случае импульс формируется не только за счет разрядки конденсатора, но и за счет процесса насыщения в нелинейной индуктивности.

При разработке экспериментального стенда необходима минимизация паразитной индуктивности колебательного контура, иначе значительная часть энергии конденсатора переходит в энергию магнитного поля в паразитных индуктивностях, что особенно проявляется в связи с малыми размерами сердечника, и для достижения его насыщения необходимо повышение напряжения. Радиально-симметричная компоновка стенда (рис. 2) позволила в значительной степени снизить паразитную индуктивность колебательного контура.

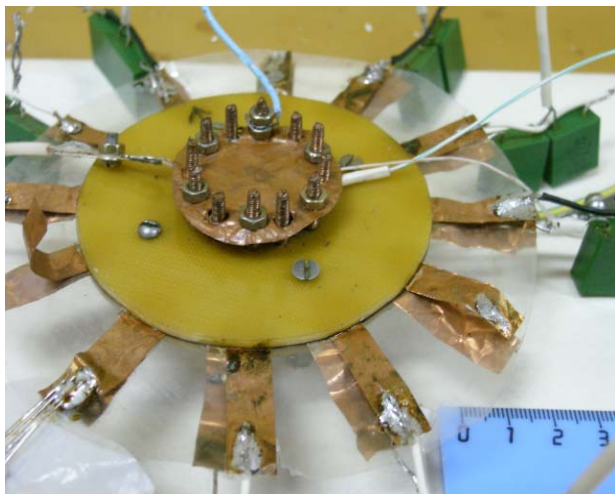


Рис. 2. Общий вид стенда

Конструкция стенда схематически показана на рис. 3. Основу составляют две круглые пластины 1 и 2, изготовленные из фольгированного текстолита, проводящие слои которых разделены слоем изоляции 3. Сердечник 4 размещен внутри полости, образованной внутренним проводником 6 и крышкой 5, изготовленной из медной фольги и соединенной посредством проводящих винтов с пластиной 2. Проводник, в свою очередь соединен с пластиной 1, а с другой

стороны он заострен, образуя таким образом с крышкой 5 искровой промежуток. К проводникам пластин 1 и 2 присоединены конденсаторы 7, объединенные в 8 конденсаторных сборок. После зарядки конденсаторов разряд в искровом промежутке инициируется нажатием на гибкую крышку 5, для безопасности крышка заземлена. Имеется также вторичная (измерительная) обмотка сердечника с единственным витком, а также обмотка для размагничивания (на рис. 3 не показаны).

На рис. 4 изображена эквивалентная электрическая схема стенда.

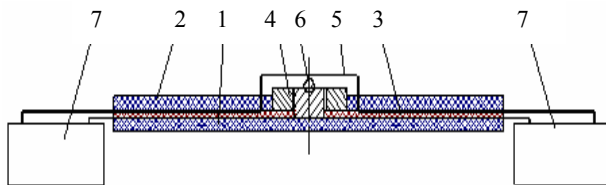


Рис. 3. Конструкция стенда

Емкость конденсаторной сборки составляет 25 нФ, каждая из них состоит из двух конденсаторов К71-7, соединенных последовательно; то есть общая емкость  $C = 200$  нФ. В одну из сборок встроен шунт с сопротивлением  $R_{ш} = 0,325$  Ом для измерения тока, протекающего через обмотку сердечника. С одной стороны, наличие такого шунта вносит некоторую асимметрию в протекание токов, но математическое моделирование показало, что погрешность, вносимая шунтом, незначительна. Паразитные параметры контура – сопротивление проводников  $R_n$  и индуктивность  $L_n$  определяются экспериментальным способом: получением переходного процесса в колебательном контуре при отсутствии сердечника. Значения сопротивлений делителя ( $R_1$  и  $R_2$ ) равны соответственно 57,6 Ом и 5,65 кОм. Низковольтное плечо делителя посредством кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом подключено к осциллографу.

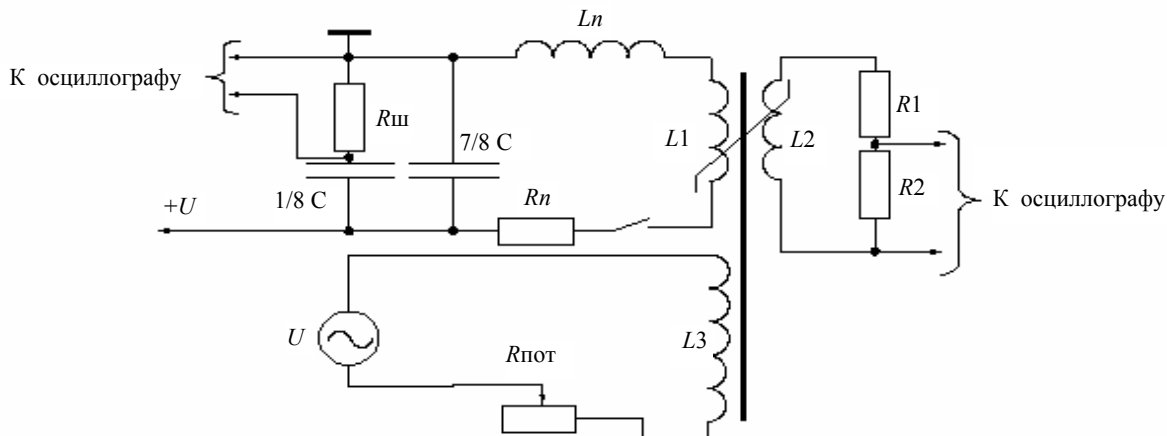


Рис. 4. Эквивалентная схема стенда:  $R_{ш} = 0,325$  Ом – сопротивление шунта для измерения тока в обмотке сердечника;  $C = 200$  нФ – суммарная емкость конденсаторов;  $L_n, R_n$  – паразитные индуктивность и сопротивление проводников;  $L_1$  – индуктивность обмотки сердечника;  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки;  $R_1, R_2$  – делитель напряжения вторичной обмотки;  $R_{пот}$  – потенциометр;  $L_3$  – обмотка для размагничивания;  $U$  – источник переменного напряжения

## Измерение магнитной индукции насыщения

Были произведены три серии экспериментов при различных зарядных напряжениях конденсаторов: 200 В (3 эксперимента), 400 В (10 экспериментов) и 660 В (3 эксперимента). После каждого эксперимента сердечник размагничивался.

На рис. 5 показана осциллограмма сигнала с делителя вторичной обмотки при зарядном напряжении 200 В. Длительность фронта импульса составляет около 10 нс, форма импульса близка к прямоугольной. Согласно выражению (1), площадь под кривой напряжения пропорциональна магнитной индукции, и в момент, когда напряжение становится равным нулю, индукция достигает максимума. Фрагмент кривой  $B(H)$  (петли гистерезиса) для данного импульса показан на рис. 6. Видно, что индукция насыщения для данного сердечника в данном импульсе равна 1,2 Тл. С учетом того, что не весь объем сердечника занят ферромагнетиком (коэффициент заполнения равен 70–80 %), и заявленная производителем индукция насыщения равна приблизительно 1,5 Тл, полученное значение можно считать достоверным.

К сожалению, в экспериментах удалось получить только фрагмент петли гистерезиса, характер колебаний, происходящих после основного импульса, не позволяет получить недостающий участок петли.

Более точно значение индукции насыщения определялись при зарядном напряжении 400 В. Было произведено 10 экспериментов, в которых было получено значение индукции насыщения, равное  $B = 1,24 \pm 0,01$  Тл. Далее, так как зарядное напряжение конденсаторов выше, то для насыщения требуется меньшее время, и выходной импульс становится более коротким. На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов напряжений, полученных при зарядных напряжениях 400 и 660 В.

Из приведенных осциллограмм видно, что длительность импульса убывает при увеличении зарядного напряжения, и значение индукции насыщения не уменьшается с уменьшением длительности импульса по крайней мере до пределов, полученных в эксперименте. Длительность фронта импульса не превышает 5 нс, что, по-видимому, частично обусловлено реактивностью измерительной цепи.

Если продифференцировать выражение (1), то видно, что скорость нарастания индукции пропорциональна приложенному напряжению. На рис. 8 приведены кривые намагничивания сердечника для различных зарядных напряжений. Из графиков видно, что ширина петли гистерезиса, а значит, и потери в сердечнике, увеличиваются с увеличением скорости нарастания индукции. Однако определение зависи-

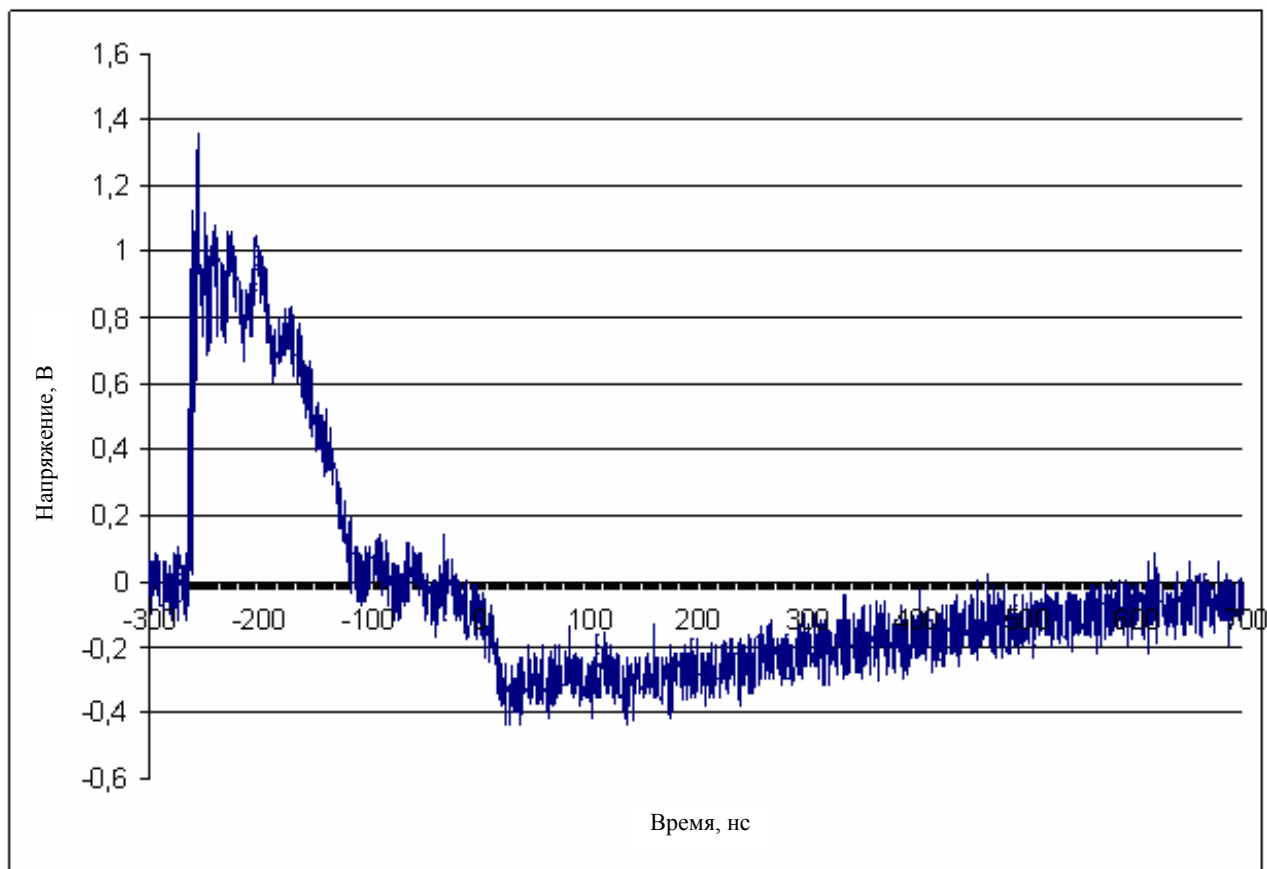


Рис. 5. Выходной импульс (зарядное напряжение – 200 В)

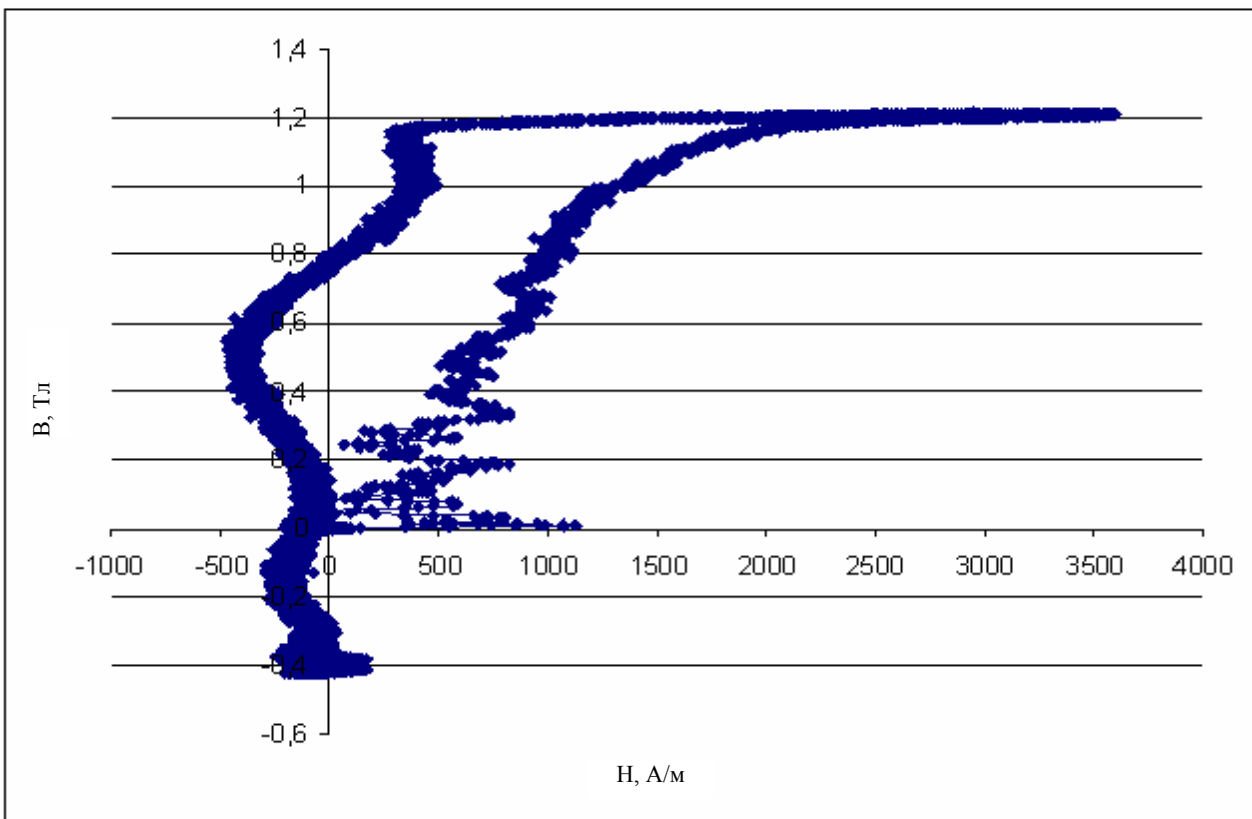


Рис. 6. Петля гистерезиса при зарядном напряжении конденсаторов 200 В

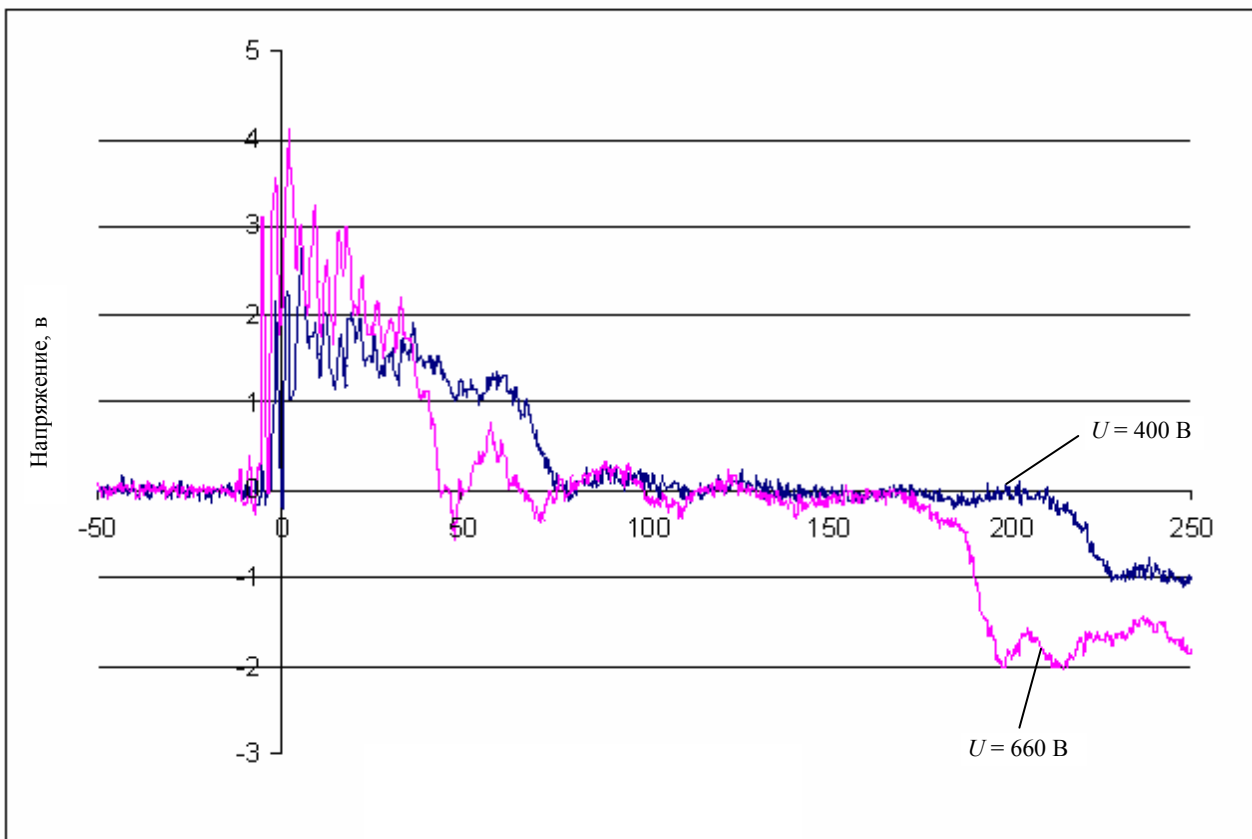


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения с делителя вторичной обмотки при зарядных напряжениях конденсаторов 400 В и 660 В

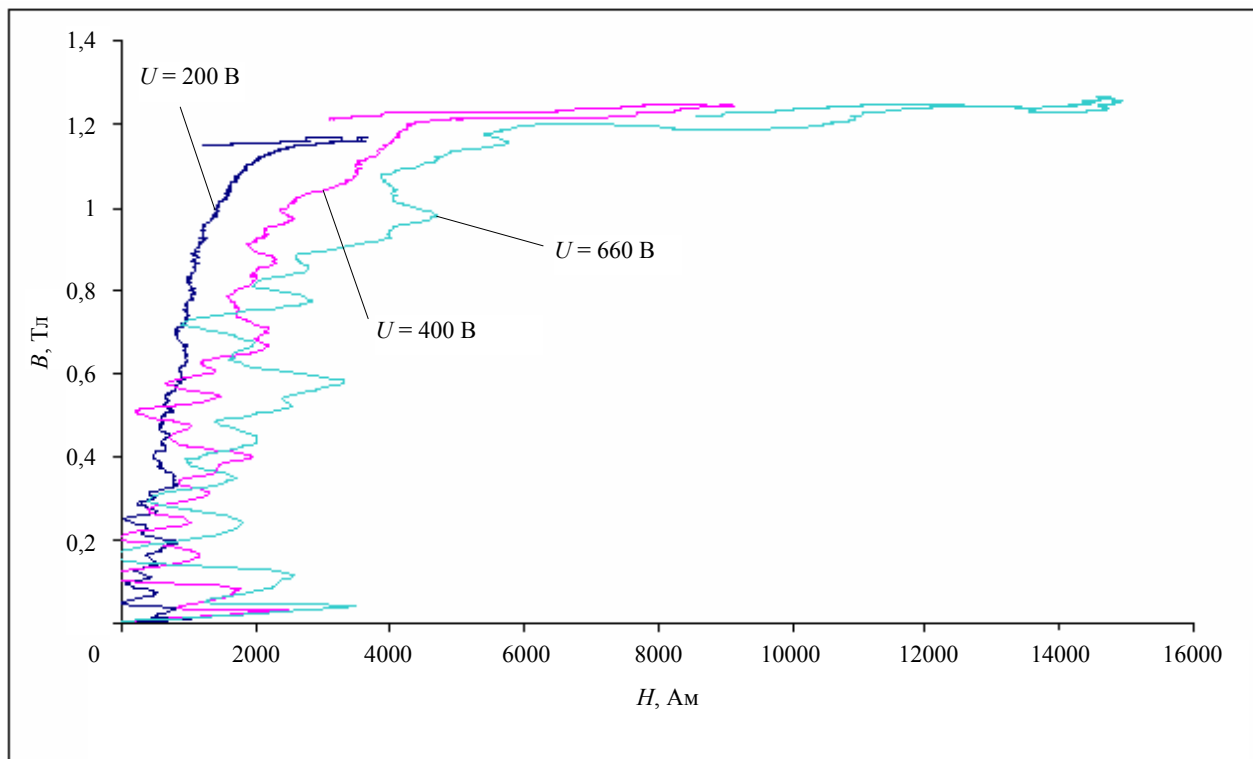


Рис. 8. Кривые намагничивания сердечника в зависимости от зарядного напряжения

мости величины потерь от скорости нарастания магнитной индукции не было целью данной работы.

### Заключение

В работе подтверждено, что сердечники из аморфного ферромагнитного сплава обладают заявленными свойствами при временах порядка 10 нс. Это подтверждается малой длительностью фронта импульса ( $\sim 5$  нс) и результатами измерений магнитной индукции насыщения. Для исследуемого образца получено значение магнитной индукции насыщения  $B = 1,24 \pm 0,01$  Тл, что с учетом коэффициента заполнения, равного 70–80 %, соответствует заявленному значению для сплава 2НСР.

### Литература

1. Smith I. D. Induction voltage adders and the induction accelerator family / PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS – ACCELERATORS AND BEAMS, VOLUME 7, 064801, 2004.
2. Burdt R., Curry R. D. Magnetic core test stand for energy loss and permeability measurements at a high constant magnetization rate and test results for nanocrystalline and ferrite materials / REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 79, 094703, 2008.
3. Huddle C. W., Johnson D. L., Denison G. J., Franklin T. L. Testing of the Inductive Cores for HERMES III / 6<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1987.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И. В. Филатов, А. О. Бакумов, С. В. Воеводин, А. С. Долотов, М. М. Иванов,  
И. Г. Федосеев, В. А. Чернышов, П. А. Шарбанов, Ю. М. Шибитов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Для ряда научных и технических приложений актуальным является создание источника ионизации сред низкого давления в магнитном поле, способного сформировать однородную плазму с концентрацией не менее  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  в объеме  $1-10 \text{ м}^3$  [1]. Перспективным для этих целей является несамостоятельный разряд с термокатодом, который способен обеспечивать за сетчатым анодом поток электронов с энергией  $50-100 \text{ эВ}$  с плотностью тока до  $10 \text{ А/см}^2$  [2, 3].

## Оксидный термокатод

Среди известных типов прессованный оксидный термокатод (ТК) [4] при высокой эмиссионной способности и большом сроке службы имеет самые низкие работу выхода электронов, рабочую температуру, мощность накала и стоимость. При этом он достаточно устойчив к отравлению остаточными газами и ионной бомбардировке.

В работе использовался произведенный в ФГУП «Исток» г. Фрязино прессованный оксидный термокатод  $\varnothing 37 \text{ мм}$  с запасом активного вещества  $40 \text{ мг/см}^2$ .

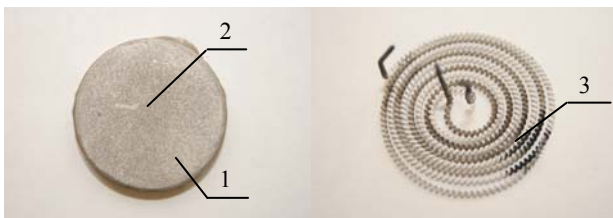


Рис. 1. Эмиссионная поверхность и нагреватель

Основным элементом конструкции ТК является эмиссионная поверхность, представляющая собой kern 1 из сплава Ni с нанесенным на него губчатым слоем 2. Губчатый слой заполнен карбонатами щелочно-земельных металлов.

На тыльной стороне керна располагается нагреватель, представляющий собой две витые вольфрамовые нити  $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ , покрытые керамикой для предотвращения пробоя на корпус.

## Формирование несамостоятельного разряда

Разряд формировался в плоскопараллельном электродном промежутке при низких давлениях газа,

т. е. на начальной стадии представлял собой вакуумный диод.

Идеализированная вольтамперная характеристика (ВАХ) вакуумного диода условно может быть разбита на три области (рис. 2).

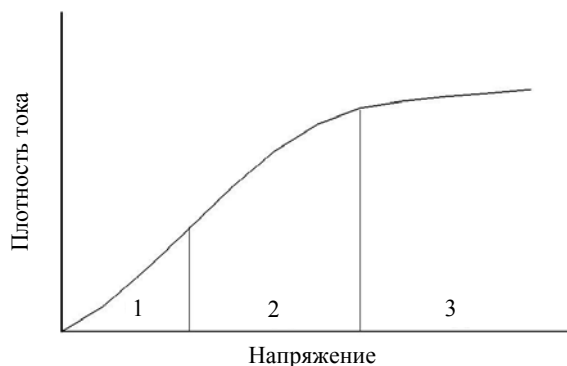


Рис. 2. Идеализированная ВАХ вакуумного диода

В области 1 анодный ток ограничен отрицательным объемным зарядом электронов пучка, растет с анодным напряжением, слабо зависит от температуры катода и определяется по формуле Чайльда–Ленгмюра

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}, \quad (1)$$

где  $j, \text{ А/см}^2$  – плотность тока;  $U, \text{ В}$  – напряжение;  $d, \text{ см}$  – межэлектродное расстояние.

Область 2 является переходной, где плотность тока в диоде зависит как от напряжения, так и от температуры.

В области насыщения 3 зависимость анодного тока от напряжения исчезает и каждый эмитированный электрон достигает анода. В этом случае плотность тока эмиссии зависит только от температуры и может быть вычислена по формуле Ричардсона – Дешмана

$$j = AT^2 \exp\left\{-\frac{\phi}{kT}\right\} \quad (2)$$

где  $A$  – универсальная термоэлектронная постоянная Зоммерфельда;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\phi$  – работа выхода электронов.

При увеличении давления, когда концентрация нейтралов достигнет пороговой величины, определяемой неравенством

$$n_0 i \frac{2}{\sigma_i L} \frac{jm}{M} \frac{1}{u}, \quad (3)$$

существенной становится ионизация газа пучком электронов. При этом за время  $\tau_i$  в промежутке нарабатывается плазма

$$\tau_i = \frac{1}{n_0 \sigma_i u}. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_i$  – сечение ионизации;  $m$  – масса электрона;  $M$  – масса иона;  $L$  – длина разрядного промежутка;  $u$  – скорость пучка. При этом влияние объемного заряда пучка снижается, а ток разряда увеличивается.

## Экспериментальная часть

Разрядный промежуток образован оксидным термокатодом  $\varnothing 37$  мм, вмонтированным в алюминиевый диск  $\varnothing 400$  мм, и проволочной сеткой, размещенной на диэлектрических опорах (рис. 3). Сетка выполнена из вольфрамовой проволоки  $\varnothing 0,8$  мм, натянутой на квадратный каркас со стороной 100 мм с шагом 5 мм. Эксперименты проводились при межэлектродных расстояниях 8 и 105 мм. Электродная система размещалась в металлической камере  $\varnothing 1$  м и длиной 5 м.

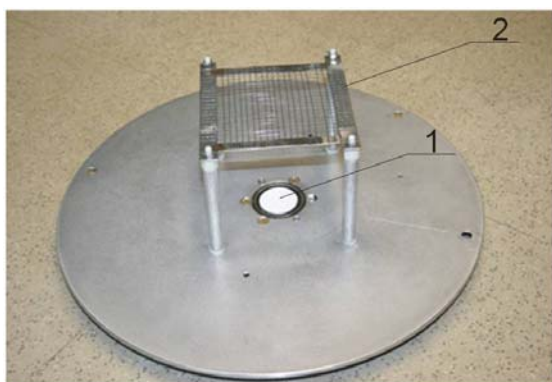


Рис. 3. Электродная система разряда: 1 – термокатод; 2 – вытягивающий анод

В экспериментах проводилось измерение напряжения на промежутке, тока с термокатода и тока с сетки (рис. 4).

ТК разогревается источником питания ИП2 до рабочей температуры при подключенном к сети источнике бесперебойного питания ИБП. Емкость  $C1$  заряжается источником питания ИП1. Перед коммутацией  $C1$  на промежуток, ИБП отключается от сети. Напряжение на промежутке ТК – ВА появляется при срабатывании электронного коммутатора SA1.

Для исследования эмиссионных характеристик термокатода на первом этапе эксперименты проводились в режиме вакуумного диода. На рис. 5 представлены полученные в экспериментах ВАХ вакуумного диода при давлениях остаточного газа  $5 \cdot 10^{-7}$  торр и межэлектродном расстоянии 8 мм и плотность тока, рассчитанная по формуле (1).

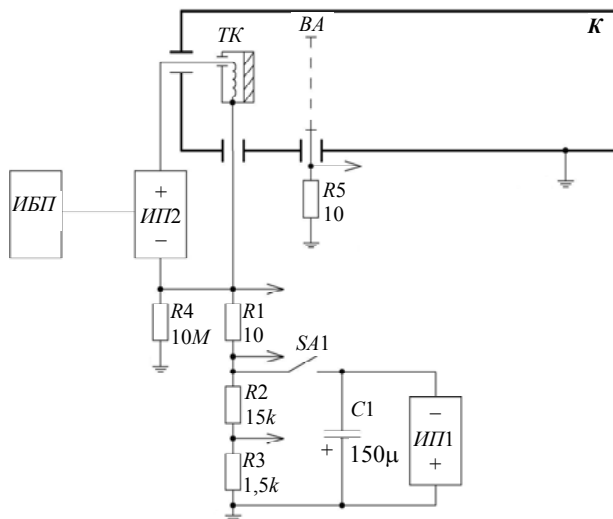


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема стенда: R2:R3 – делитель напряжения; R1, R5 – шунты; ВА – вытягивающий анод; К – металлическая камера

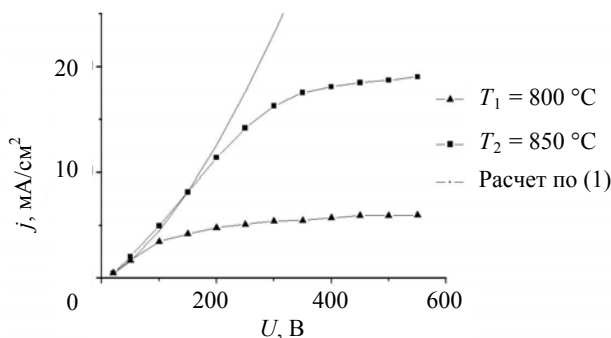


Рис. 5. Зависимость плотности тока вакуумного диода от напряжения

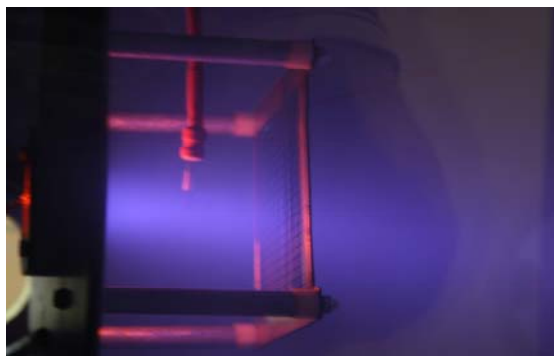
Как видно из рисунка начальные участки ВАХ хорошо описываются формулой Чайльда–Ленгмюра. Ток в переходной области и в насыщении зависит от температуры, большей температуре соответствует большее значение тока насыщения. Полученная из обработки экспериментальных данных работа выхода электронов с термокатода составляет 2 эВ.

Целью второго этапа работы являлось исследование несамостоятельного разряда в зависимости от рода и давления газа, температуры термокатода, анодного напряжения и индукции магнитного поля. На рис. 6 представлены интегральные фотографии свечения разряда без магнитного поля и в магнитном поле индукцией 80 мТл.

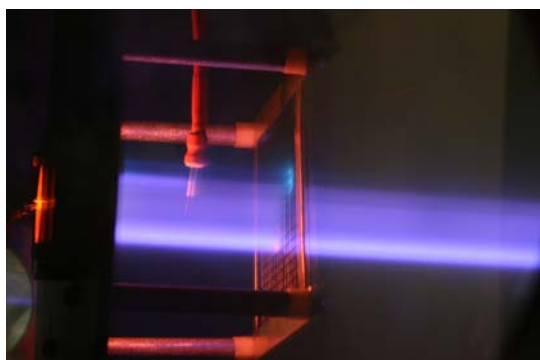
Как видно из фотографий свечение наблюдается и за пределами сетки, что обусловлено возбуждением и ионизацией газа в промежутке ВА – К. Без магнитного поля свечение разряда имеет размытые контуры и слабую интенсивность, при включении поля плазменный столб приобретает четкие границы.

На рис. 7 представлена зависимость плотности тока разряда от индукции продольного магнитного поля в Ag при давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  торр, анодном напряжении 80 В и температуре катода 850 °С.





а



б

Рис. 6. Интегральная фотография свечения разряда без магнитного поля (а) и в магнитном поле индукцией 80 мТл (б)

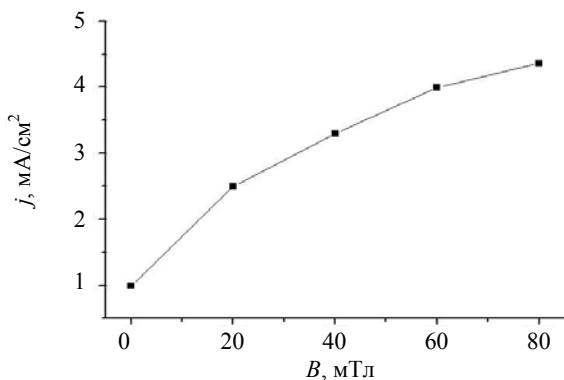


Рис. 7. Зависимость плотности тока разряда от индукции магнитного поля

Видно, что с ростом индукции магнитного поля плотность тока увеличивается. Это объясняется уменьшением ларморовского радиуса ионов плазмы, их ухода за пределы разрядного промежутка и, как следствие, увеличением степени ионизации в промежутке катод-анод.

На рис. 8 представлены ВАХ разряда в Ar и He при давлении  $5 \cdot 10^{-4}$  торр, индукции магнитного поля 80 мТл и температуре катода  $950^\circ\text{C}$ .

Как следует из этих данных, плотность тока разряда в Ar приблизительно в три раза превышает плотность тока в He, что, по-видимому, объясняется меньшим потенциалом ионизации атомов Ar.

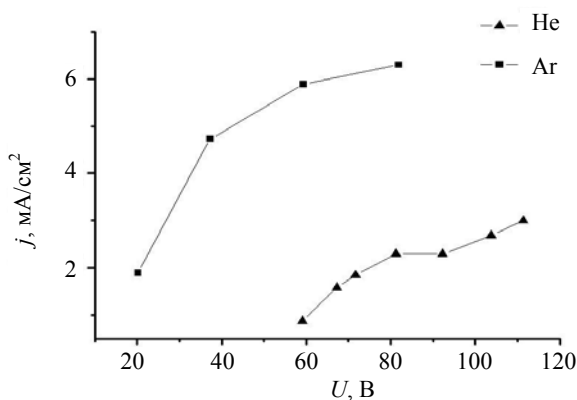


Рис. 8. ВАХ разряда, нормированные на единицу площади термокатода

На рис. 9 представлена зависимость плотности тока разряда от давления Ar для анодного напряжения 80 В и температуры катода  $850^\circ\text{C}$ .

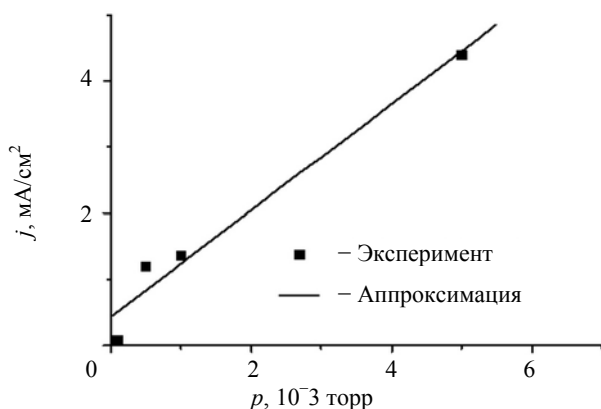


Рис. 9. Зависимость плотности тока разряда от давления Ar

Зависимость близка к линейной. Рост плотности тока с увеличением давления среды объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов в газе, увеличением числа ионизационных столкновений и снижением экранировки объемным зарядом.

На рис. 10 представлена зависимость плотности тока разряда от температуры ТК в Ar при давлении  $1 \cdot 10^{-3}$  торр, анодном напряжении 35 В и индукции магнитного поля 80 мТл.

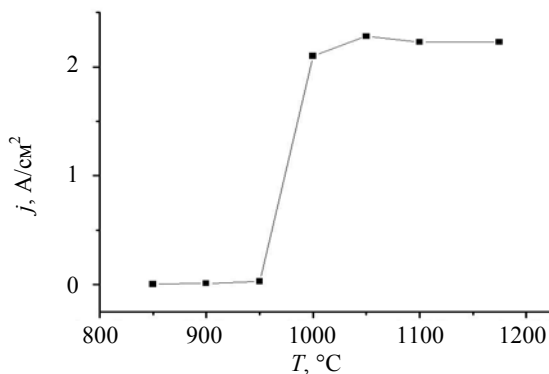


Рис. 10. Зависимость плотности тока разряда от температуры катода

Видно, что в диапазоне 950–1000 °С происходит резкое увеличение плотности тока разряда, что, по-видимому, связано с более эффективным протеканием реакции термической диссоциации окисла ВаО.

### **Заключение**

Проведены исследования источника ионизации на основе самостоятельного разряда низкого давления с оксидным термокатодом Ø37 мм, изготовленным в ФГУП «Исток» г. Фрязино.

Исследованы эмиссионные характеристики термокатада в режиме вакуумного диода в диапазоне анодных напряжений 0–500 В при давлении остаточного газа  $5 \cdot 10^{-7}$  торр.

Исследован самостоятельный разряд в Ag и He в диапазоне давлений  $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  торр, температур катода 800–1200 °С, анодных напряжений 0–120 В и индукции внешнего продольного магнитного поля 0–80 мТл. Показано, что максимальная плотность

тока разряда 2–3 А/см<sup>2</sup> достигается при температурах катода более 1000 °С.

Результаты измерения тока на корпус камеры и фотографической регистрации свечения разряда показали, что электроны с катода при давлениях  $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  торр обеспечивают ионизацию газа на расстояниях не менее 1,5 м от источника.

Авторы благодарны к.ф.-м.н. В. В. Горохову и д.ф.-м.н. В. И. Карелину за обсуждение работы и полезные замечания.

### **Литература**

1. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2009. ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров, 2010.
2. Незлин М. В. Динамика пучков в плазме. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Rev. Sci. Instrum. Vol. 62, N 12. 1991.
4. Киселев А. Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. М.: Изд-во МФТИ, 2002.

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Е. В. Халдеев, Л. А. Андреевских, Н. Н. Жбанова, А. В. Пахомов, Ю. В. Шейков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе представлена разработка автоматизированного комплекса (АК) для исследований взрывчатых веществ (ВВ) при тепловых воздействиях, являющихся важнейшим направлением изучения ВВ с точки зрения безопасности обращения на всех этапах их жизненного цикла.

Основные требования к АК для исследований свойств ВВ при тепловых воздействиях состояли в следующем:

- управление нагревом экспериментальных образцов (сборок) с ВВ в динамическом (от 0,1 до 10 °С в минуту) и изотермическом режимах от 0 до 360 °С с отклонением температуры от требуемой не более на  $\pm 1\%$  (мощность усилителя от 4 до 10 кВА);
- измерение температуры не менее чем по четырем точкам с погрешностью не более  $\pm 2,0$  °С;
- создание архивов полученных экспериментальных данных;
- минимальный период опроса измерительных каналов не более 500 мс;
- мобильность (возможность быстрого монтажа (демонтажа) аппаратуры для проведения экспериментов на разных рабочих местах (внутренние полигоны ВНИИЭФ), отсутствие дополнительных устройств преобразования и питания, общая масса комплекса не более 20 кг).

В результате анализа технических характеристик средств автоматического регулирования и измерения температуры выбран комплект приборов, объединенный в автоматизированный комплекс в виде двух систем: системы нагрева и системы измерения и регистрации температуры (СИРТ) (см. рис. 1).

Система нагрева состоит из следующих подсистем (см. рис. 1):

- 1) микропроцессорный программный регулятор «IMAGO 500»;
- 2) тиристорный регулятор мощности ТУА-110/3 (мощность 5,5 кВА);
- 3) объект регулирования (тепловая камера для нагрева ВВ);
- 4) хромель-алюмелевая термопара для регулирования с диаметром электродов 0,1 мм, рабочего спая 0,2 мм;
- 5) хромель-алюмелевый удлинительный провод поэлектродной компенсации термоЭДС.

Система измерения и регистрации температуры состоит из следующих подсистем (см. рис. 1):

- 6) управляющий компьютер с программными средствами обработки данных;
- 7) мультиметр Keithley 2001 с девятиканальной сканирующей платой TCSCAN 2001 (период опроса измерительных каналов 500 мс);
- 8) хромель-алюмелевый удлинительный провод поэлектродной компенсации термоЭДС;
- 9) хромель-алюмелевые термопары для измерения с диаметром электродов 0,1 мм, рабочего спая 0,2 мм.

Для управления СИРТ разработано программное обеспечение (ПО) на базе пакета TestPoint [1]. Основной ПО является программа для управления мультиметром Keithley 2001, состоящая из следующих основных элементов: предварительного сценария, основной задачи, экранной формы отображения процесса измерения.

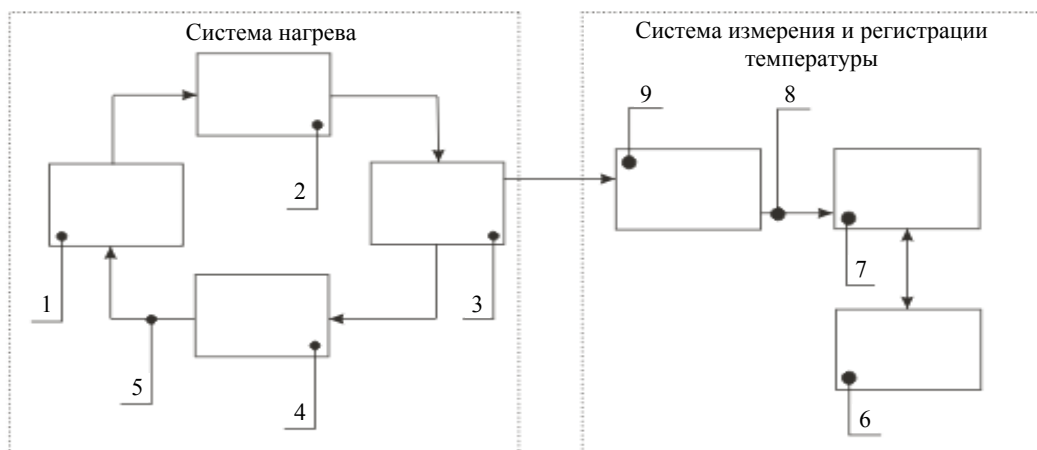


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного комплекса для исследований свойств ВВ при тепловых воздействиях

Предварительный сценарий определяет параметры основной задачи программы и необходим для выбора элементов пакета TestPoint, обеспечивающих управление и контроль СИПТ.

Основная задача программы формирует настройку:

- выбранных элементов управления, контроля и установления связи между ними;
- параметров мультиметра Keithley 2001 и сканирующей платы TCSCAN 2001;
- приема и обработки информации с мультиметра Keithley 2001;
- отображения результатов измерения в цифровом и графическом виде и построения графической зависимости температуры от количества интервалов сканирования;
- сохранения данных на жестком диске компьютера.

Экранная форма отображения предназначена для контроля оператором за ходом процесса измерения. Внешний вид экранной формы отображения представлен на рис. 2.

Автоматизированный комплекс работает следующим образом:

1. Заданное оператором значение температуры в тепловой камере сопоставляется с текущим значением. Сигнал рассогласования подается с регулятора «IMAGO-500» на вход тиристорного усилителя ТУА-110/3, который непосредственно воздействует на объект регулирования. Регулятор «IMAGO-500» позволяет выполнять:

– управление процессом по стандартным законам регулирования [2, 3] с возможностью выдачи управляющих сигналов в аналоговой и/или дискретной форме;

– «самооптимизацию» параметров под особенности объекта регулирования (функция автоматической настройки параметров регулирования);

– хранение в энергонезависимой памяти настроек для двух разных объектов регулирования;

– одновременное управление тепловыми процессами в четырех объектах регулирования.

2. Компьютер выдает сигналы управления на мультиметр Keithley 2001. Мультиметр опрашивает измерительные каналы и при поступлении данных посылает их в компьютер для последующей записи и отображения на экране.

Общая масса АК 17 кг.

Тестирование системы нагрева проведено в области наиболее часто используемых режимов нагрева при исследованиях теплового взрыва с тепловой камерой (см. рис. 3).

1. Скорость нагрева 0,5 °С/мин, выдержка при заданной температуре не менее 30 мин, температура нагрева до 150 °С (кривая нагрева приведена на рис. 4).

2. Нагрев со скоростью 2 °С/мин до 100 °С, затем нагрев со скоростью 1 °С/мин до 200 °С и далее нагрев со скоростью 0,5 °С/мин (кривая нагрева приведена на рис. 5).

Из рис. 4 и 5 видно, что нагрев камеры с имитатором ВВ диаметром 50 мм и высотой 40 мм осуществляется в соответствии с заданным режимом. Отклонение значения температуры не превышает ±1 %, продолжительность переходного процесса составляет не более 4 минут (см. рис. 4). Термопара для регулирования была установлена на границе камера – имитатор ВВ.

Для нагрева ВВ в другой тепловой камере необходимо рассчитать параметры настройки для регулятора «IMAGO-500».

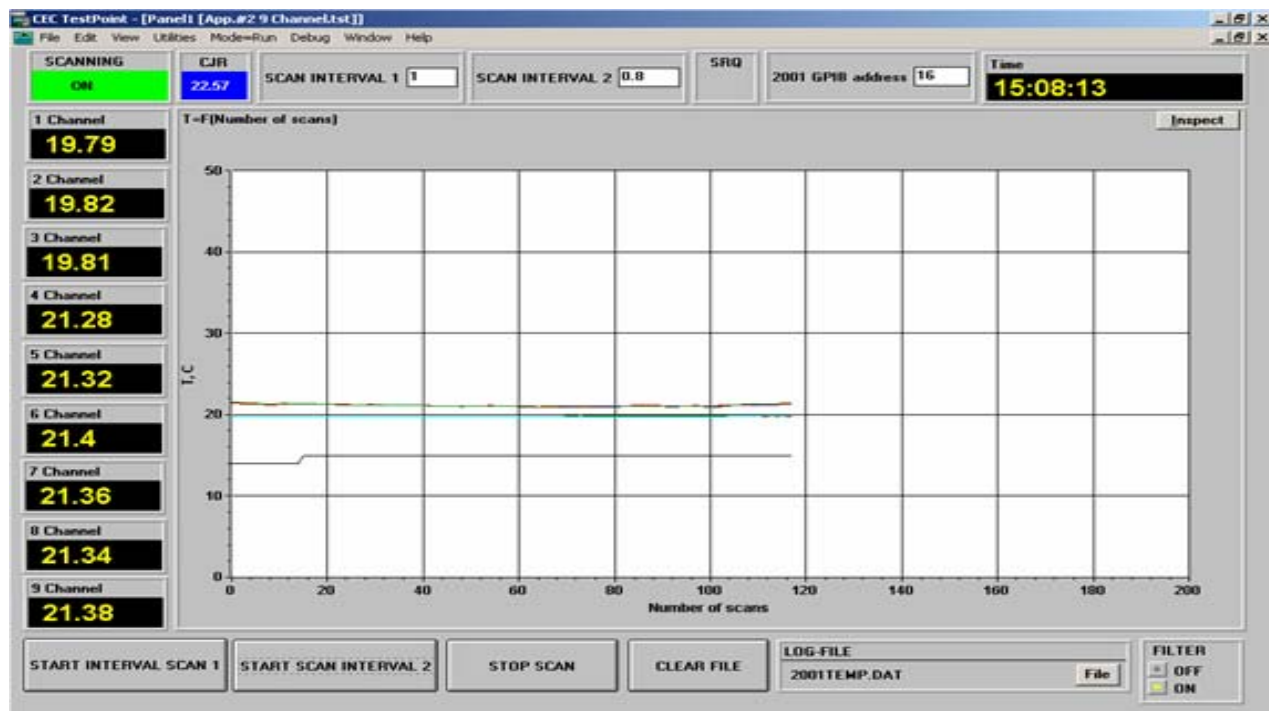


Рис. 2. Внешний вид экранной формы отображения

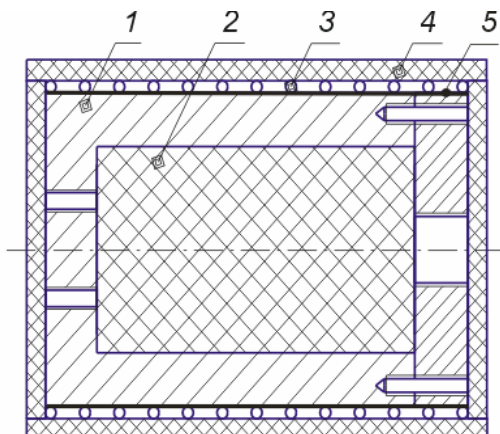


Рис. 3. Тепловая камера для нагрева ВВ: 1 – корпус камеры; 2 – инертный материал (имитатор ВВ) размерами  $\text{Ø}50 \times 40$  мм; 3 – электронагреватель (нихромовый провод сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ ); 4 – асбестовая изоляция; 5 – теплостеклоткань ЛСК-150

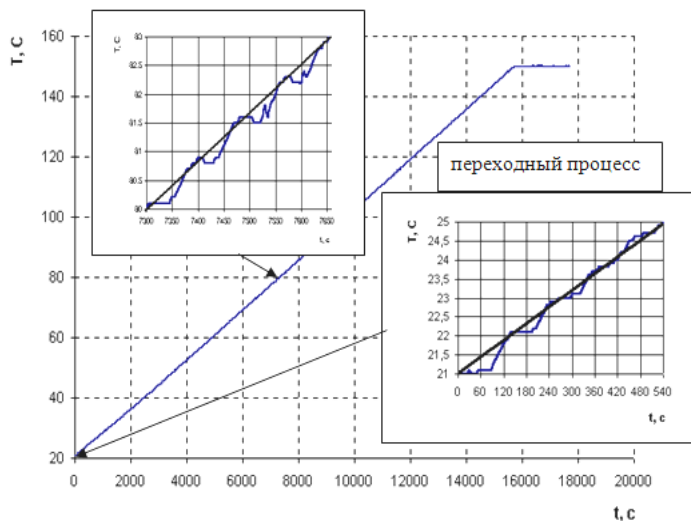


Рис. 4. Кривая нагрева образца  $\text{Ø}50 \times 40$  мм из имитатора ВВ – 2 в тепловой камере со скоростью  $0,5 \text{ °C/мин}$

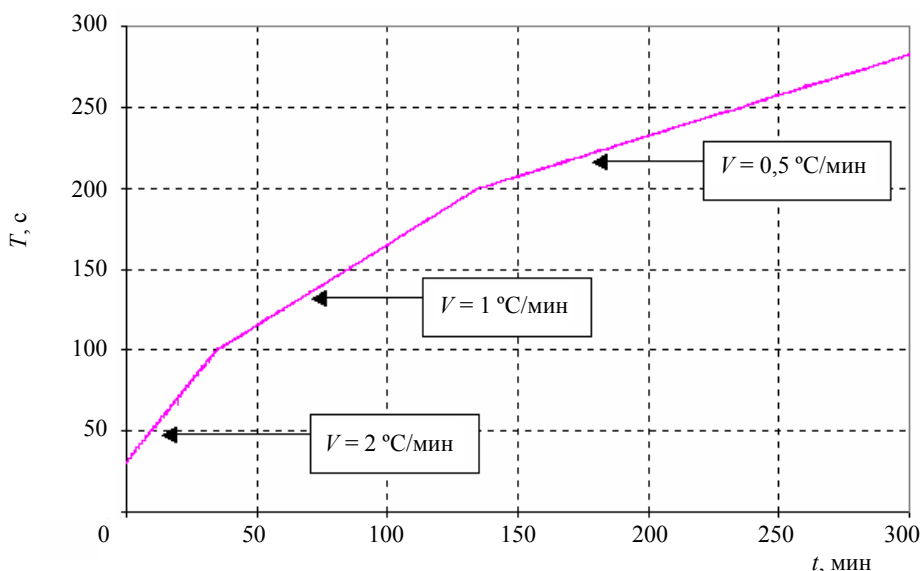


Рис. 5. Кривая нагрева образца  $\text{Ø}50 \times 40$  мм из имитатора ВВ – 2 в тепловой камере с различными скоростями

При расчете параметров настройки регулятора «ИМАГО-500» предпочтительно использовать ПИ (пропорционально-интегральный) закон регулирования, который наиболее часто применяется при регулировании тепловых энергетических процессов. ПИ – регулирование направлено на устранение установившейся ошибки регулирования [1]. Параметрами настройки ПИ – регулятора являются «коэффициент передачи регулятора  $k_p$ » и «постоянная времени издромы  $T_{из}$ », которые могут быть получены при исследовании кривой переходной характеристики объекта регулирования. По кривой переходной характеристики камеры рассчитываются параметры настройки регулятора с помощью формул [1, 2]. Данный метод является наиболее простым из имеющихся вариантов расчета параметров настройки регулятора.

Погрешность системы измерения и регистрации температуры равна  $\pm 1,7 \text{ °C}$  (коэффициент Стьюдента  $t = 2,000$  при вероятности  $P = 0,95$ ).

С использованием разработанного АК проведено исследование теплового взрыва заряда ВВ, нагрев которого проводили в тепловой камере (см. рис. 4).

Заряд ВВ состоял из:

- детали из пластифицированного ВВ на основе ТАТБ,  $\text{Ø}40 \times 15$  мм;
- детали из пластифицированного ВВ на основе октогена,  $\text{Ø}60 \times 25$  мм.

Нагрев ВВ проводили до  $215 \text{ °C}$  со скоростью  $0,5 \text{ °C/мин}$  с выдержкой при этой температуре в течение расчетного времени. На рис. 6 представлены графики нагрева ВВ в тепловой камере.

Процесс нагрева ВВ завершился взрывом, который произошел вследствие возникновения теплового взрыва октогена (см. рис. 6). На рис. 6 указан фазовый переход в октогене из  $\beta$ - в  $\delta$ -модификацию в диапазоне температур  $165\text{--}180 \text{ °C}$  и критическая температура теплового взрыва октогена.

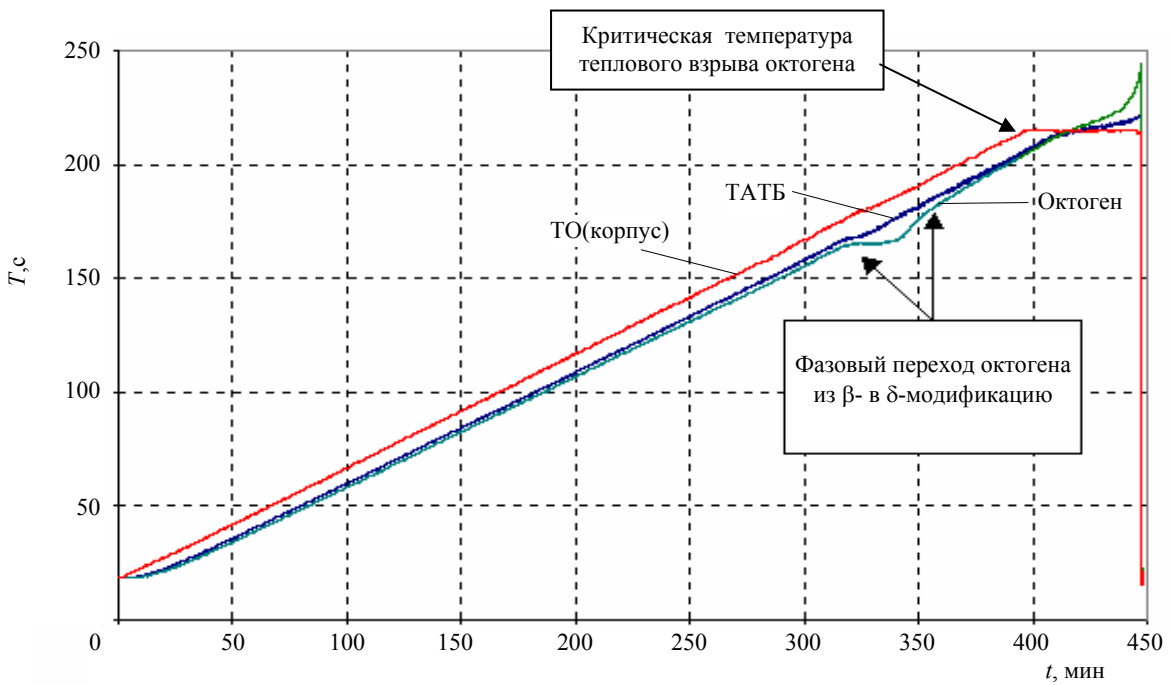


Рис. 6. Графики нагрева ВВ в тепловой камере

Как видно из графика, АК обладает достаточной чувствительностью, чтобы зарегистрировать процесс фазового перехода в октогене. С помощью АК также можно регистрировать такие переходные процессы, происходящие при нагреве ВВ, как, например, плавление ВВ. Полученные данные позволяют более точно представлять процессы, происходящие с ВВ при повышенных температурах.

Таким образом, разработанный АК удовлетворяет предъявленным требованиям и позволяет проводить следующие исследования ВВ:

- возникновение теплового взрыва ВВ;
- работоспособность ВВ при высокотемпературном нагреве;

– индукционный период до начала интенсивного разложения ВВ и др.

### Литература

1. TestPoint (№ лиц. 11846). Techniques and reference. TestPoint users guide № 04000–901000. Vol. 2. Sixth edition. The USA, 1999.
2. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. 2-е изд. М.: Энергия, 1972.
3. Клюев А. С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРАГМЕНТАЦИИ ТОНКИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Д. В. Ханин, М. А. Сырунин, В. Ю. Мельцас, Г. Ф. Портнягина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработка новых экспериментальных методов, позволяющих исследовать поведение материалов и конструкций, механизмы их разрушения при воздействии импульсных (взрывных) нагрузок, крайне важна для более глубокого понимания физических процессов, связанных с разрушением, создания более совершенных физических и математических моделей разрушения, совершенствования методов расчетного моделирования процессов разрушения. Одним из таких новых методов, который сейчас внедряется в практику газодинамических исследований, является импульсная протонная радиография. С помощью данного метода можно устанавливать определяющие механизмы разрушения, исследовать их кинетику, что позволяет достоверно оценивать и прогнозировать размеры образующихся частиц и фрагментов при разрушении материала, их последующее движение и воздействие на преграды.

В данной работе представлены результаты двух протонных радиографических экспериментов, в которых исследовалась фрагментация (разрушение) полусферических оболочек при взрыве прилегающего к внутренней стороне оболочки полусферического заряда взрывчатого вещества (ВВ). В первом эксперименте оболочка была изготовлена из стали Ст20, во втором – из алюминиевого сплава АМг-6.

Протонографические опыты проводились по общей схеме, вид которой приведен на рис. 1. Фотография готовой сборки для стальной оболочки приведена на рис. 2. В обоих опытах была использована половина сферического заряда ВВ радиусом 16,3 мм и массой 14,5 г. Обе полусферических оболочки имели внутренний диаметр равный диаметру ВВ с минимальным допуском для обеспечения собираемости с зарядом. В первом опыте с оболочкой из стали Ст20 толщина стенки равнялась  $\delta_1 = 0,4$  мм. Отношение массы инертного окружения ВВ к массе ВВ составляло ~36,6 %. Толщина стенки алюминиевой оболочки во втором опыте  $\delta_2 = 1,15$  мм. При этих размерах было обеспечено отношение массы инертного окружения ВВ к массе ВВ ~38 % (что соответствует удельной массе стальной оболочки).

Кадры протонографических изображений, полученные в опыте со стальной полусферой, показаны на рис. 3 (кадры протонографических изображений для алюминиевой полусферы в общем виде аналогичны кадрам для стальной полусферы и поэтому не приводятся). Для построения графиков зависимости приращения  $dR$  радиуса кромки полусферы (или рас-

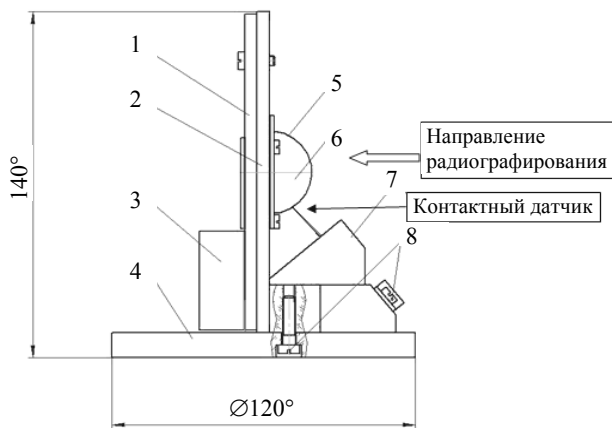


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки: 1 – демпфер из пенопласта плотностью  $0,3 \text{ г/см}^3$  в виде диска диаметром 120 мм и толщиной  $h_2 = 5$  мм; 2 – экран в виде диска диаметром 120 мм из оргстекла толщиной  $h_1 = 5$  мм; 3 – розетка и ЭД; 4 – диск; 5 – полусферическая оболочка; 6 – полусфер из ВВ радиуса  $R = 16,3$  мм и массой  $m = 14,5$  г; 7 – опора электроконтактного датчика; 8 – винты

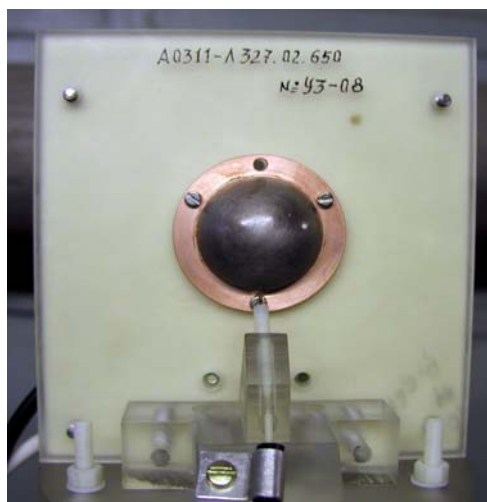


Рис. 2. Фотография экспериментальной сборки с оболочкой из стали Ст20

ширения) от времени в каждом кадре вычисляли изменение  $dR$  радиуса  $R$  на видимой кромке расширяющейся стальной оболочки. В качестве масштаба использовали диаметр крепежного кольца  $D$ , который был неизменным по результатам сравнения со статическими кадрами. Замеры показали, что видимая кромка стальной и алюминиевой оболочек близка к окружности на каждом из кадров.



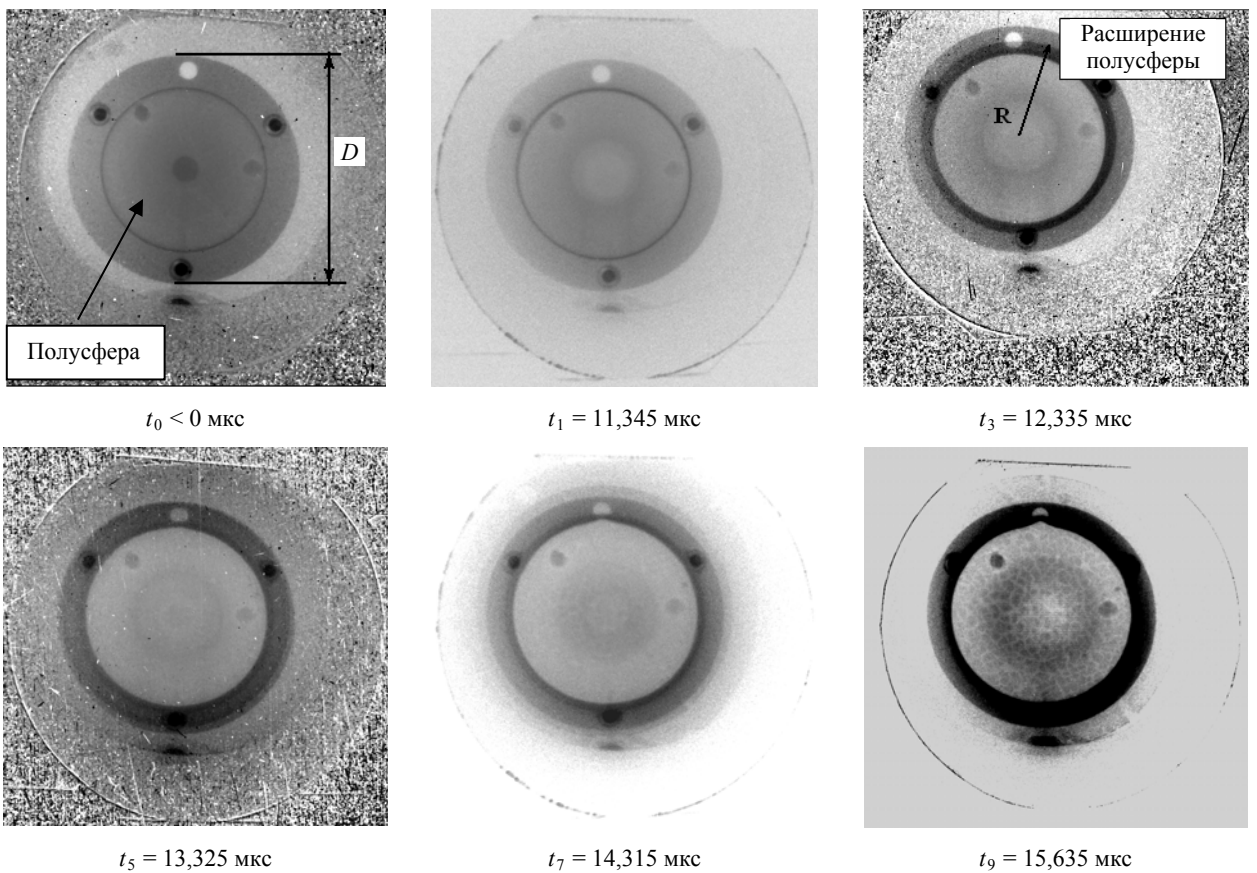


Рис. 3. Протонограммы стальной полусферы, полученные на различные моменты времени

Графики зависимости приращения  $dR$  радиуса кромки полусферы по результатам обработки кадров протонографии показаны на рис. 4. Линейная аппроксимация полученных точек движения кромки полусфер показывает хорошее согласие с экспериментальными данными и позволяет оценить скорость расширения оболочек, которая для полусферы из стали Ст20 составила  $V_1 = 2,59$  км/с, а для полусферы из алюминиевого сплава АМг-6  $V_2 = 2,24$  км/с, что практически совпадает с данными расчетов. Расчетное время начала воздействия при отражении волны детонации ВВ от стальной оболочки полусферы  $t_0 = 11,28$  мкс согласуется с экспериментальной оценкой времени начала движения полусферы  $t_0^* = 11,213$  мкс, получаемой путем продления до оси абсцисс аппроксимирующей опытные данные прямой (рис. 4,а).

Экспериментальная оценка времени начала движения алюминиевой полусферы  $t_0^* = 11,26$  мкс, также получаемая продлением до оси абсцисс аппроксимирующей опытные данные прямой (рис. 4,б), удовлетворительно согласуется с расчетным временем начала воздействия при отражении волны детонации ВВ от поверхности алюминиевой полусферы  $t_0 = 11,53$  мкс.

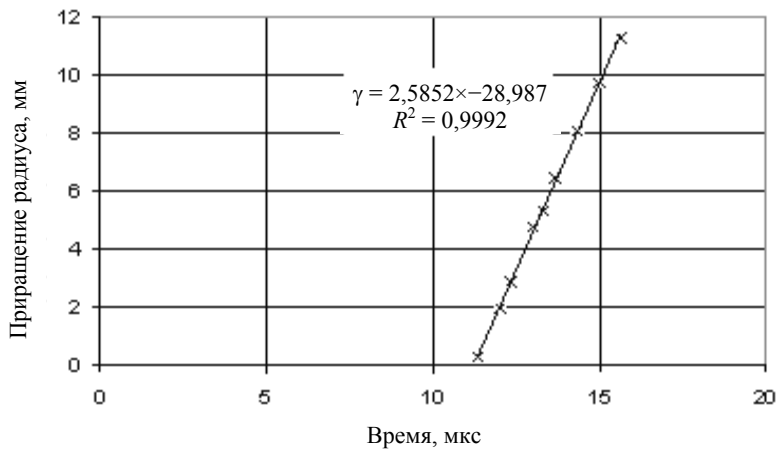
Оценка количества осколков для стальной и алюминиевой полусфер, наиболее хорошо различимых по последним протонографическим кадрам, проводилась следующим образом. Подсчитывали

количество осколков, на хорошо видимом сегменте полусферы. Число осколков в пересчете на полную сферу вычисляли умножением числа осколков, подсчитанных на сегменте, на отношение площади всей сферы к площади сегмента. Из кадра на время  $t = 15,635$  мкс для стальной полусферы были выделены границы разрывов между осколками (рис. 5,а). Для алюминиевой полусферы границы разрывов между осколками были выделены из кадра на время  $t_{11} = 16,370$  мкс (рис. 5,б).

Красными точками помечены осколки, видимые целиком, а синими – осколки, видимые частично (заходят за край окружности диаметра  $D_{окг}$ ), их количество учтено в половинном размере. Общее количество осколков в пересчете на полную сферу для стали Ст20 составило  $N_{ст} = 2813$  шт., для алюминия АМг-6  $N_{ал} = 2265$  шт. Для обеих оболочек проведен также расчет при уменьшенном диаметре окружности сферического сегмента  $D_{окг}^*$ , где образовавшиеся осколки видны наиболее четко на изображении. В этом случае для стали Ст20 получено количество осколков  $N_{ст} = 2922$  шт. и для алюминия АМг-6  $N_{ал} = 2229$  шт., что близко к предыдущим результатам и результатам предварительных опытов с аналогичными сборками, где было получено по щитовой методике число осколков для стальной сферы  $N_{ст} = 3346$  шт., для алюминиевой сферы  $N_{ал} = 2146$  шт.

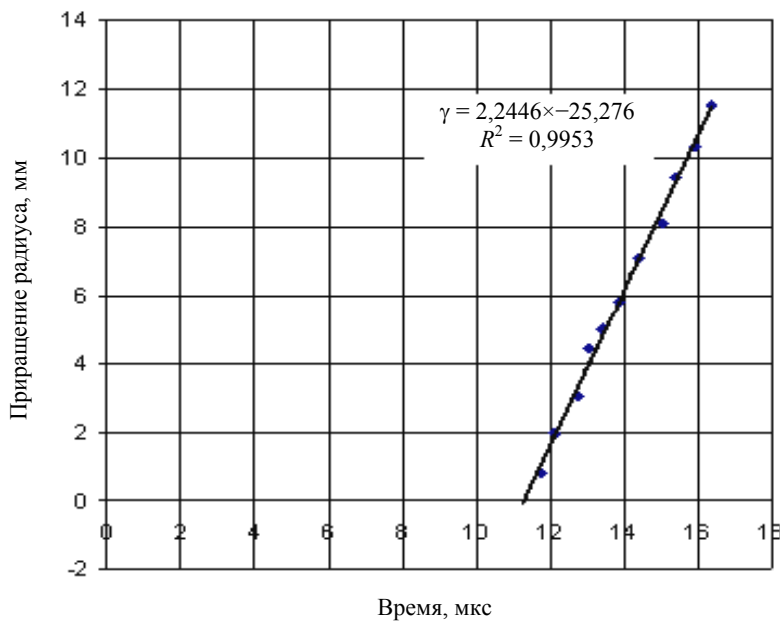
В работах [1, 2] описан метод расчета фрагментации тонких цилиндрических и сферических метал-

лических оболочек под действием динамической



× Точки движения оболочки по протонограммам

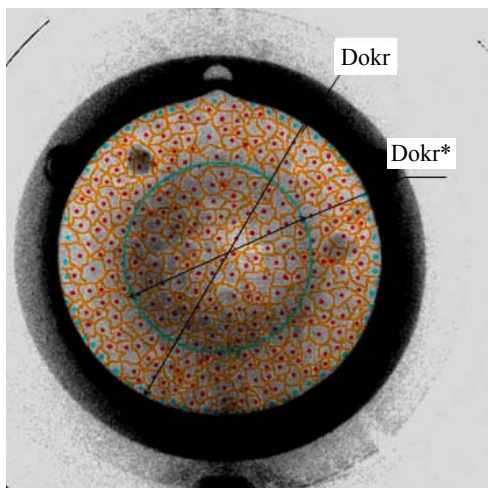
а



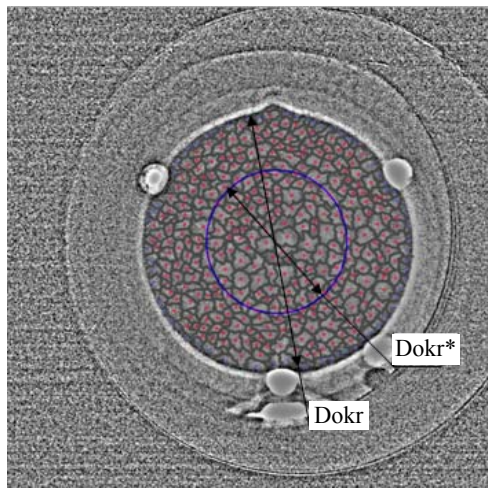
◆ Точки движения оболочки по протонограммам

б

Рис. 4. Результаты обработки кадров протонографии по определению движения кромки полусферы:  
а – из стали Cr20; б – из алюминия АМг-6



а



б

Рис. 5. Схема подсчета числа осколков по протонограмме: а – стальной полусферы; б – алюминиевой полусферы нагрузки с вычислением спектра по массе фрагментов. Этот метод был реализован в комплексе ДИАДА-2D [3]. Проведенные расчеты показали, что при надлежащем выборе характерного размера (массы) фрагмента, полученное число фрагментов хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Вычислить характерную массу фрагмента можно двумя способами. Первый – если известно заранее общее число фрагментов, то, разделив массу сферической оболочки на число фрагментов, получим величину, которую можно принять за характерную массу. Второй способ – приближенное вычисление характерной массы. Для стальной сферической оболочки в работе [4] приведена эмпирическая формула для вычисления характерного размера осколков  $d$  из баланса упругой энергии и работы разрушения при дроблении оболочек

$$d = 8\lambda E / Y^2, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости (для стали –  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>);  $Y$  – динамический предел текучести;  $\lambda$  – работа разрушения после пластической деформации.

В расчетах с алюминиевой оболочкой для определения характерного размера осколков был выбран критерий определения размера осколка по формуле из [5]

$$a_k = \frac{24\gamma}{\rho \&}^{1/3}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – поверхностная энергия разрушения твердого тела,  $\&$  – скорость деформации.

Расчетная геометрия фрагментации для стальной и алюминиевой полусфер представлена на рис. 6.

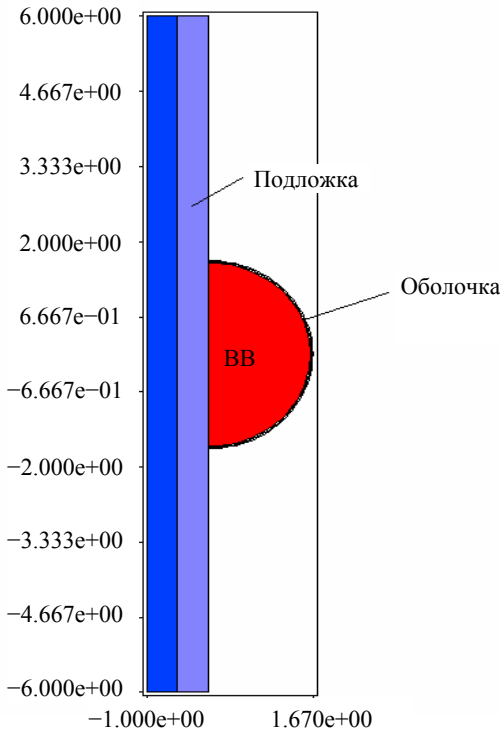


Рис. 6. Постановка расчета

Отметим, что фрагментация полусферы с полусферическим зарядом происходит не одновременно, а растянута по времени. Для стальной полусферической оболочки фрагментация начинается в момент  $t_n = 5,19$  мкс и заканчивается в момент  $t_k = 5,46$  мкс (здесь, как и далее, время отсчитывается от начала детонации), для алюминиевой полусферы фрагментация оболочки началась на момент времени  $t_n = 5,29$  мкс над центром заряда и закончилась на  $t_k = 5,75$  мкс вблизи подложки. Фрагментация задерживается вблизи подложки из-за значительного уменьшения скорости оболочки, связанного с разгрузкой в продуктах взрыва. На рис. 7 приведены формы для стальной оболочки на отдельные моменты времени.

На рис. 8 показаны скорости элементов оболочки по времени для стальной и алюминиевой оболочек соответственно. Для обоих материалов вблизи подложки скорость оболочки в 1,6 раза меньше, чем на полюсе.

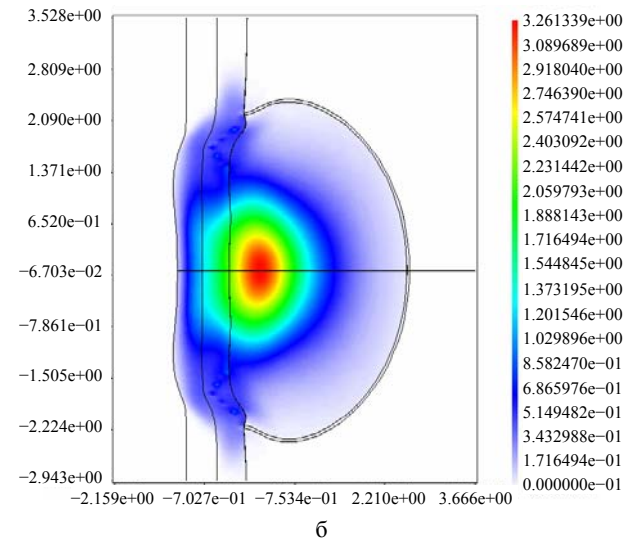
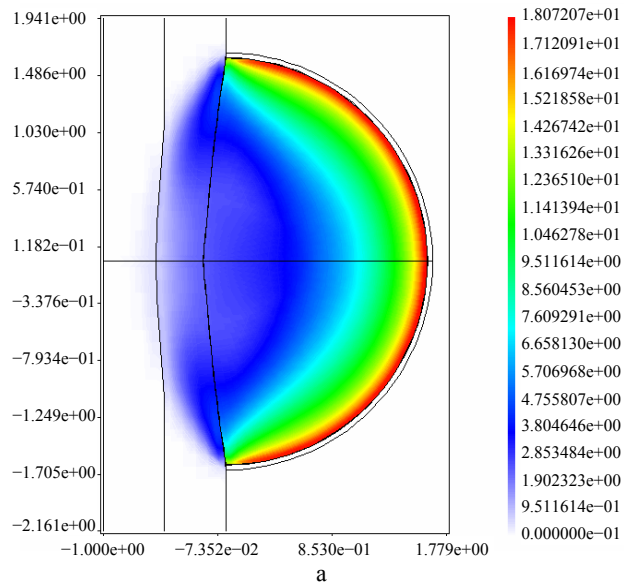
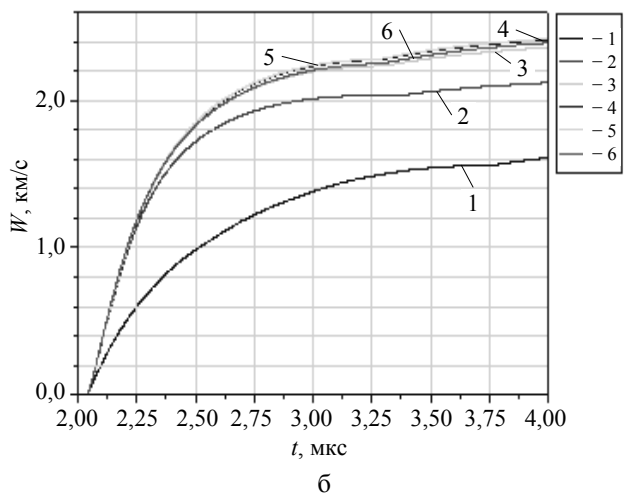
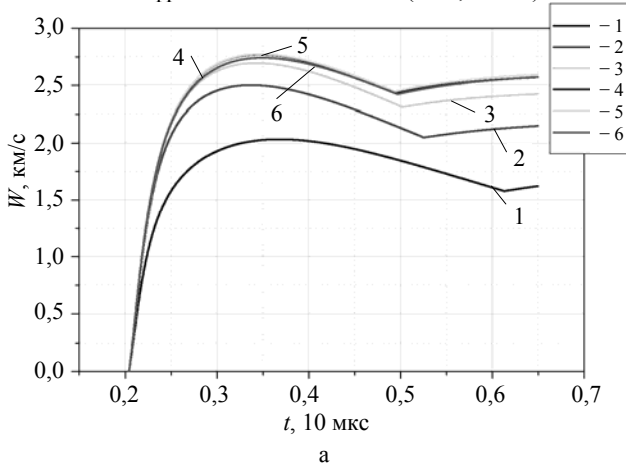


Рис. 7. Поле давления в стальной оболочке: а – на момент окончания детонации ( $t = 2,04$  мкс); б – на момент окончания фрагментации оболочки ( $t = 5,46$  мкс)



1 –  $\alpha = 3^\circ$ , 2 –  $\alpha = 30^\circ$ , 3 –  $\alpha = 45^\circ$ , 4 –  $\alpha = 60^\circ$ ,  
 5 –  $\alpha = 75^\circ$ , 6 –  $\alpha = 90^\circ$   
 (угол  $\alpha$  отсчитывается от подложки)

Рис. 8. Зависимость от времени скорости в отдельных ее точках: а – стальной оболочки; б – алюминиевой оболочки

Расчеты с характерным размером, вычисленным по формуле (1) для стальной оболочки и по формуле (2) для алюминиевой дали общее количество осколков для стальной сферы 3190 и для алюминиевой 1882 осколка, что согласуется с экспериментальными данными по количеству фрагментов.

На рис. 9 полученные данные по количеству осколков сопоставлены с данными опытов работы [4], в которой были проведены опыты по взрывной фрагментации стальных и алюминиевых сфер с радиусом шара ВВ 33, 51 и 90 мм с близким отношением массы оболочек к массе ВВ  $\sim 0,3$ . Данное сравнение показывает хорошую зависимость числа осколков от масштаба сборки (радиуса шара ВВ).

Представленные данные анализа результатов протоннографических опытов с рассматриваемыми сборками показали возможность приемлемой визуализации состояния сборки для анализа процесса разгона, начала и развития фрагментации, а также количественных оценок числа фрагментов, образующихся при взрывном дроблении прилегающей к ВВ оболочки из стали или алюминия. Эти данные удовлетворительно согласуются с аналогичными данными, полученными ранее с применением других методик, и могут быть использованы при разработке модели взрывной фрагментации оболочек и численных методик для расчетов взрывных явлений с образованием высокоскоростных осколков.

Таким образом, метод протонной радиографии перспективен для получения информации о количественных и временных параметрах при исследовании начальной стадии высокоскоростного разрушения и фрагментации оболочек из конструкционных материалов.

Авторы выражают благодарность за большой вклад в создание работы А. Л. Михайлову, а также В. В. Бурцеву и А. В. Рудневу за проведение измерений и обработку результатов.

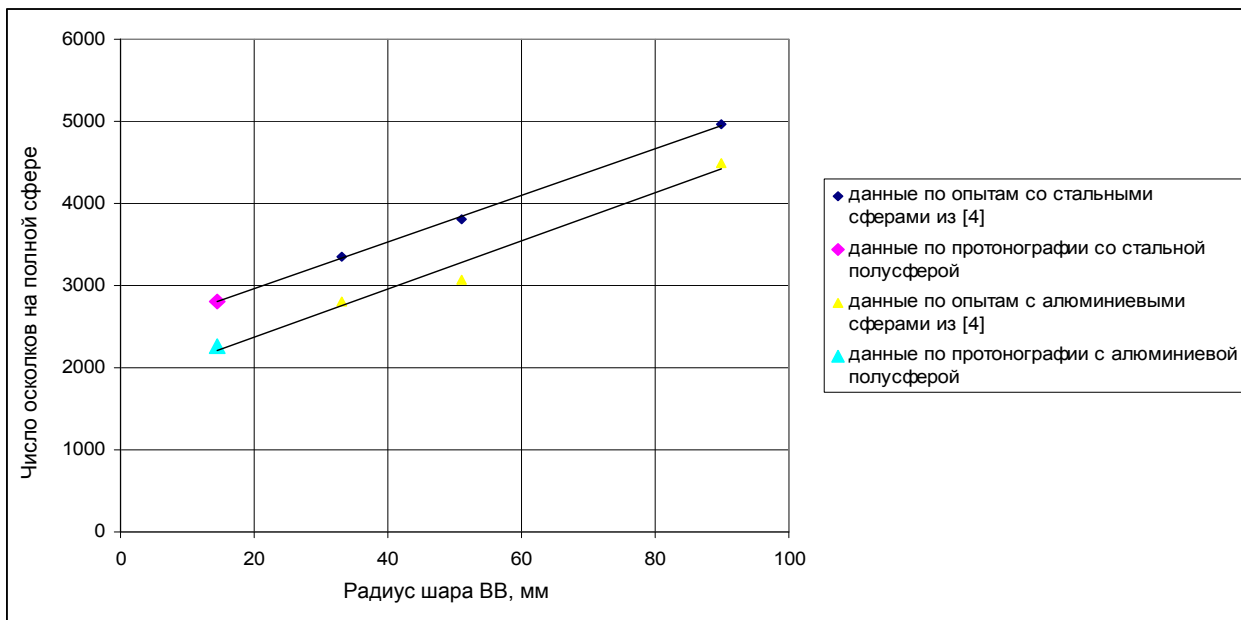


Рис. 9. Сравнение проведенных опытов по фрагментации оболочек при взрыве прилегающего шарового заряда ВВ

### Литература

1. Киселев А. Б. Простейшие математические модели разрушения космического аппарата при взрыве // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 2. С. 159–165.

2. Киселев А. Б. Математическое моделирование взрывного разрушения сферических оболочек с образованием двух фракций осколков // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. 1999, № 2. С. 41–48.

3. Величко О. М., Губкова Г. Н., Дерюгин Ю. Н. и др. Пакеты программ для решения многомерных

задач газовой динамики разностным методом Годунова // Сб. докл. научной конференции Волжского регионального центра РАН АН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», 2000.

4. Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Цой А. П. Дробление сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Проблемы прочности. 2001, № 2. С. 78–87.

5. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: Российский федеральный ядерный центр-ВНИИЭФ, 2001.

# ПОДГОТОВКА ПЛАЗМОФОКУСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ К ВЗРЫВНОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ

З. С. Цибиков, В. Е. Аблесимов, А. А. Базанов, Г. В. Карпов, А. И. Краев, А. Т. Шахалкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

При запитке плазмфокусных источников нейтронов от взрывомагнитных генераторов (ВМГ) токами более одного мегаампера существует проблема обеспечения во взрывном эксперименте гарантированной величины нейтронного выхода. Часто происходит так, что плазменная камера, нормально работающая в лабораторных условиях, при той же амплитуде разрядного тока во взрывном эксперименте дает нулевой, или практически нулевой, выход нейтронов.

Это может быть связано с тем, что один и тот же разрядный ток во взрывном и лабораторном экспериментах достигается при существенно различающихся максимальных напряжениях на входе в камеру. Например, ток в камере  $\sim 1,5$  мА во взрывных экспериментах обычно достигается при амплитуде входного напряжения  $\sim 80$  кВ, тогда как в лабораторных условиях такой же ток может быть получен при напряжении зарядки конденсаторной батареи не выше 40 кВ. Повышенное напряжение во взрывных экспериментах может являться причиной вторичных пробоев внутри камеры, приводящих к срыву генерации нейтронов.

В связи с этим, для плазмфокусных экспериментов был разработан ВМГ с пониженной амплитудой и затянутой длительностью импульса выходного напряжения. Изменения амплитуды и длительности импульса напряжения можно выбирать так, чтобы при снижении амплитуды напряжения перебрасываемый в нагрузку максимальный ток оставался бы неизменным за счет соответствующего увеличения длительности. В ВМГ, состоящем из спирального генератора и секционированного взрывного размыкателя тока (ВРТ), изменение формы импульса напряжения достигается за счет разновременности срабатывания секций ВРТ.

В докладе излагаются результаты лабораторных опытов по подготовке разрядной камеры к взрывному эксперименту и получению данных, необходимых для определения параметров ВРТ.

## Плазмфокусная разрядная камера

Использовалась плазмфокусная разрядная камера с длинными ( $l > d$ ) цилиндрическими коаксиальными электродами, так называемая «мейзеров-

ская» камера [1]. Потенциальный электрод – анод, диаметром 70 мм. Заземленный электрод – катод выполнен в виде трубы с перфорационными отверстиями по всей поверхности. Внутренний диаметр катода 120 мм, длина 280 мм. Торцевые окончания анода и катода находятся в одной плоскости на расстоянии 280 мм от входного заземленного фланца. Анод и входной фланец разделены между собой керамическим изолятором. Диаметр изолятора 70 мм, высота 70 мм. Электродная система камеры располагается в герметичном корпусе. Конструкция камеры приведена на рис. 1. Используются неорганические вакуумные уплотнения, откачка осуществляется безмасляным турбомолекулярным насосом.

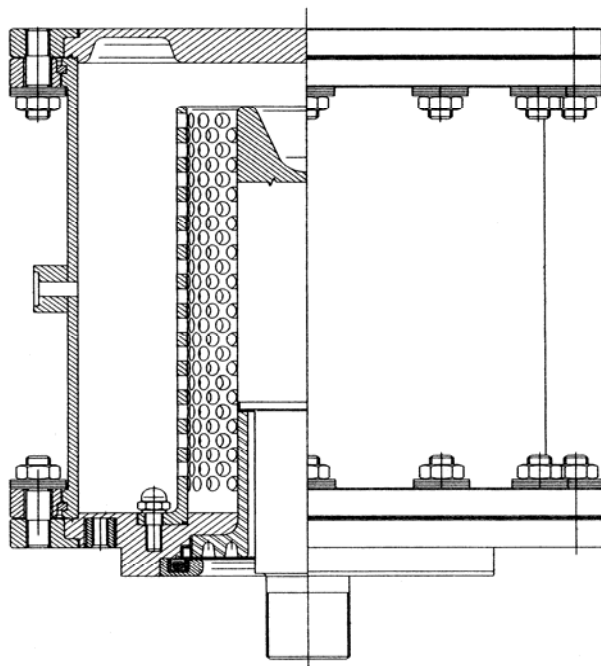


Рис. 1. Плазмфокусная разрядная камера

Целью лабораторных опытов являлось следующее: прогрев и обезгаживание рабочих поверхностей электродной системы электрическими разрядами, выявление режима стабильной работы разрядной камеры с достаточно высоким нейтронным выходом и определение закона изменения индуктивности на конденсаторной батарее при запасаемой энергии, близкой к той, которая будет во взрывном эксперименте. Лабораторные опыты проводились на установке КАСКАД, обладающей наиболее подходящими для этого параметрами.

## Конденсаторная батарея – установка КАСКАД

Установка КАСКАД представляет собой импульсную конденсаторную батарею. Установка состоит из 16 одинаковых энергетических секций емкостью 41 мкФ каждая. Максимальное зарядное напряжение батареи составляет 50 кВ. Количество используемых энергетических секций может варьироваться. Соединение секций с токовым коллектором осуществляется с помощью низкоиндуктивной кабельной линии, причем подключение кабелей к коллектору выполнено так, что переключение секций не влияет на азимутальное распределение подводимого к нагрузке тока. Максимальная энергоемкость установки 820 кДж. Каждая секция коммутируется своим твердотельным разрядником. Коммутация осуществляется путем электрического пробоя сменной изоляции мощным электрическим разрядом, создаваемым для каждой секции своим блоком поджига, синхронизированным с блоками поджига остальных секций. В качестве сменной изоляции используется набор из нескольких слоев полиэтиленовой пленки. Суммарная толщина изоляции варьируется в зависимости от зарядного напряжения батареи. Для зарядного напряжения 46–50 кВ толщина сменной изоляции составляет 750–900 мкм.

На рис. 2 представлена эквивалентная электрическая схема установки КАСКАД. Используются следующие обозначения параметров и их номинальные значения.

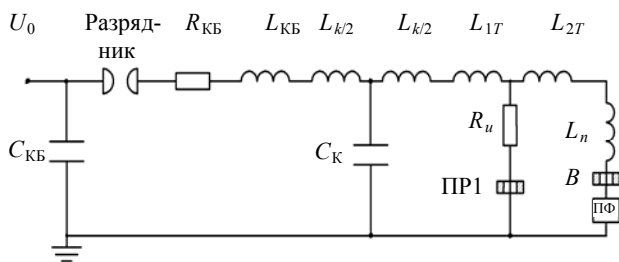


Рис. 2. Электрическая схема установки КАСКАД

Где  $C_{КБ}$  – емкость конденсаторной батареи,  $C_{КБ} = nC_S$ , где  $n$  – количество используемых секций,  $C_S = 41$  мкФ – емкость одной секции;  $U_0$  – зарядное напряжение, разрядник – коммутирующие разрядники;  $R_{КБ}$  – омическое сопротивление конденсаторной батареи,  $R_{КБ} = R_S/n$ , где  $R_S = 30$  мОм – омическое сопротивление разрядной цепи одной секции;  $L_{КБ} = 32/n$ , нГн, – индуктивность конденсаторной батареи, состоящая из индуктивностей конденсаторов, разрядников и соединительных шин между конденсаторами и разрядниками;  $L_{К} = 30/n$ , нГн, – индуктивность кабельной передающей линии между разрядниками и токовым коллектором;  $C_K = 1,7$  мкФ – емкость кабельной передающей линии.  $C_K$  является постоянной величиной, независимо от числа  $n$  используемых секций, поскольку при переключении секций неиспользуемые кабели от токового коллектора не отсоединяются.

Индуктивность токового коллектора составляет 9,2 нГн и складывается из  $L_{1T} = 5,2$  нГн и  $L_{2T} = 4$  нГн. Деление индуктивности коллектора на две части необходимо для вычисления напряжения на входе в нагрузку. На рис. 2 показана также индуктивность  $L_n$ , обозначающая индуктивность узла соединения нагрузки с токовым коллектором. Для различных нагрузок эта индуктивность может быть разной, в условиях данного эксперимента  $L_n = 13$  нГн.

## Измерения

Плазмодиффузионную разрядную камеру можно рассматривать как элемент электротехнического контура, обладающий некоторой индуктивностью и нулевым омическим сопротивлением. Индуктивность камеры  $L(t) = \Phi(t)/I(t)$  изменяется во времени из-за того, что токовая плазменная оболочка в процессе разряда движется под действием пондеромоторных сил, создаваемых разрядным током. В результате электротехнический расчет работы токового генератора на плазмодиффузионную нагрузку должен быть самосогласованным, поскольку изменяющаяся в процессе разряда индуктивность  $L(t)$  зависит от протекающего тока и сама, в свою очередь, влияет на ток. Это затрудняет возможность точного расчета работы ВРТ на плазмодиффузионную камеру для взрывного эксперимента. Приближенный расчет можно провести, используя результаты экспериментов на конденсаторной батарее при условии, что амплитуда и временные параметры токового импульса в лабораторных условиях будут примерно теми же, что и во взрывном эксперименте.

Для этого в лабораторных условиях измерялись ток  $I(t)$  и напряжение  $U(t)$  на разрядной камере, определялась зависимость от времени индуктивности  $L(t) = I^{-1} \int U dt$ , которая закладывалась затем в расчеты ВРТ для предстоящих взрывных экспериментов. Ток в камере измерялся с помощью 6 одинаковых индукционных датчиков – катушек из нескольких витков, расположенных равномерно по азимуту на расстоянии 65 мм от оси камеры. Площадь витка – 30,25 мм<sup>2</sup>; количество витков в катушке – 2. Расчетная чувствительность датчика –  $5,28 \cdot 10^{10}$  (А/с)/В. Регистрируемые сигналы пропорциональны производной тока в камере, поэтому вычисления тока проводились путем интегрирования сигналов индукционных датчиков. На рис. 3 представлены полученные таким образом зависимости разрядного тока и его производной от времени.

Напряжение на входе в камеру определялось по сигналу с пояса Роговского ПР<sub>1</sub>, измеряющего ток в активном сопротивлении  $R_U = 330$  Ом, рис. 2. При этом учитывалось падение напряжения на индуктивности  $L_{2T}$  токового коллектора установки КАСКАД. Осциллограмма напряжения на входе в разрядную камеру представлена на рис. 4. Напряжение имеет колебательный характер, что связано с электриче-



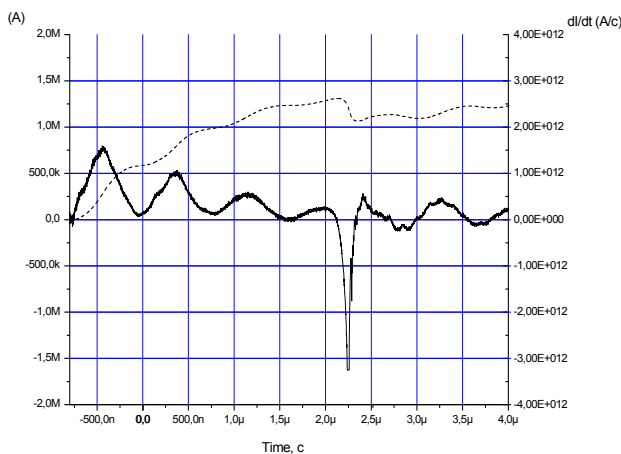


Рис. 3. Осциллограмма тока (пунктирная линия) и ее производной

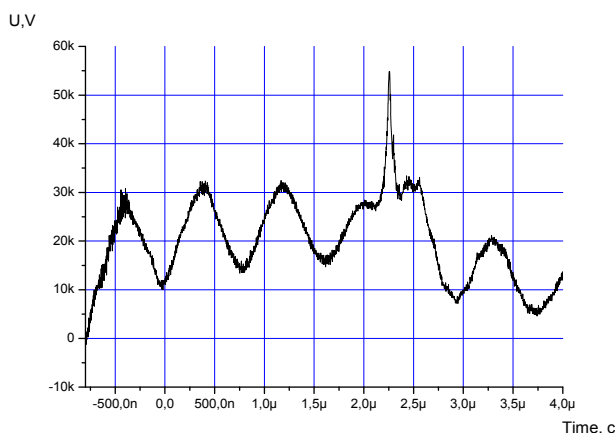


Рис. 4. Напряжение на входе в камеру

скими колебаниями передающей кабельной линии. При нормальной работе камеры, когда происходит схлопывание плазменной оболочки вблизи торца анода, на кривой напряжения происходит резкий всплеск, на осциллограммах индукционных датчиков наблюдается резкий провал, совпадающий по времени с всплеском напряжения. Этому моменту времени соответствует начало генерирования в камере нейтронного и рентгеновского излучений.

Для регистрации импульса проникающих излучений использовались сцинтилляционные детекторы типа ССДИ-8 [2], состоящие из пластмассовых сцинтилляторов и фотоэлектронных умножителей типа СНФТ. Располагая сцинтилляционный детектор на достаточном удалении от разрядной камеры, можно получить разделение по времени рентгеновского и нейтронного импульсов. В описываемых экспериментах пролетная база составляла 5,5 метра, в результате рентгеновский сигнал опережал нейтронный на  $\sim 236$  нс. Характерная осциллограмма двойного импульса сцинтилляционного детектора приведена на рис. 5. Зная чувствительность детектора, по кривой нейтронного импульса можно вычислить интегральный нейтронный выход, предполагая изотропность генерируемого излучения.

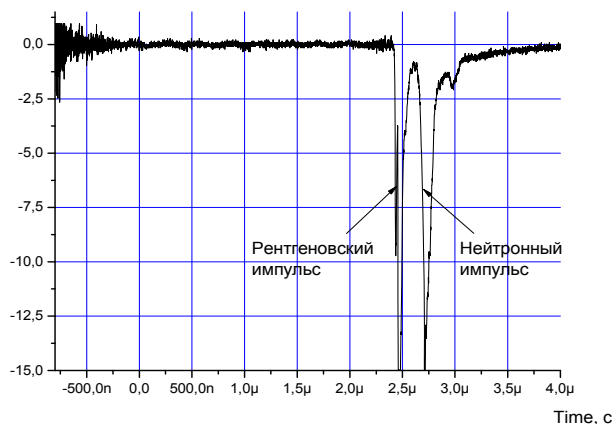


Рис. 5. Сигнал сцинтилляционного детектора

Для измерения интегрального нейтронного выхода использовались также и активационные методики [3] – методика активации серебра и методика активации индия. Данные по нейтронному выходу, полученные всеми тремя способами, удовлетворительно согласуются друг с другом. Максимальная погрешность измерения нейтронного выхода оценивается в 20 %.

## Результаты

В результате экспериментов на установке КАСКАД были отработаны режимы «тренировки» разрядной камеры и вывода на предельные выходные параметры. В первых импульсах после монтажа камеры на токовом коллекторе начальное давление дейтерия в камере составляло 1–2 торр, зарядное напряжение 40 кВ при емкости конденсаторной батареи 82 мкФ. При этих условиях достаточно было 2–3 импульсов до появления устойчивого нейтронного выхода. Далее начальная энергетика наращивалась до 270 кДж за счет увеличения числа используемых секций батареи. Зарядное напряжение варьировалось от 40 до 45 кВ при давлении рабочего газа в камере от 5 до 12 торр.

Наиболее стабильный режим работы устройства наблюдался в серии импульсов при давлении дейтерия 7 торр, суммарной емкости секций конденсаторной батареи 164 мкФ; зарядном напряжении 40 кВ. Разброс по величине нейтронного выхода в серии не превысил 10 %. Максимальный зарегистрированный нейтронный выход составил  $1,12 \cdot 10^{11}$  н/имп при амплитуде разрядного тока 1,3 МА. Стабильность нейтронного выхода, оцениваемая по всем результатам опытов на конденсаторной батарее, оказалась не хуже 30 %.

По сигналам датчиков тока и напряжения определялись не только режимы нормальной работы камеры, но и вычислялось изменение индуктивности в камере  $L(t)$ , рис. 6. Показано, что зависимость индуктивности от времени близка к линейной, причем скорость увеличения индуктивности во времени в различных разрядах остается практически неизменной, рис. 7. Полученная таким образом зависимость  $L(t)$  использовалась при расчете параметров ВРТ для взрывного эксперимента.

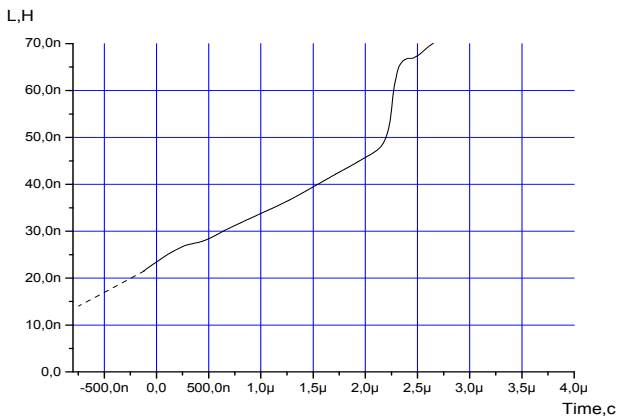


Рис. 6. Изменяющаяся в процессе разряда индуктивность камеры  $L(t)$

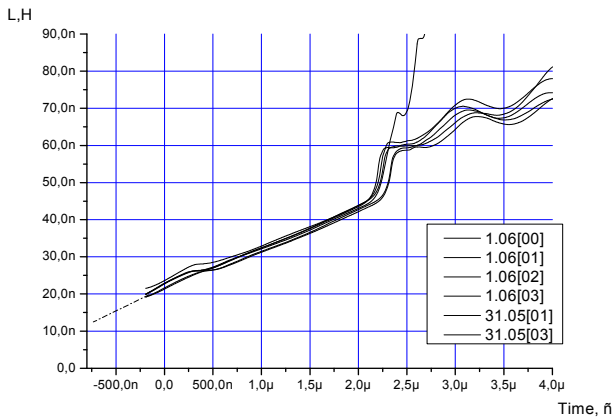


Рис. 7. Индуктивность камеры  $L(t)$  в 6 экспериментах

## Заключение

1. Используя мощную конденсаторную батарею – установку КАСКАД, отработан режим «тренировки» разрядной камеры и вывод ее на предельные выходные параметры при тех же уровнях энергетике и разрядного тока, что и в предстоящем взрывном эксперименте.

2. В камере с дейтериевым наполнением получен устойчивый выход ДД-нейтронов  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  н/имп при максимальных разрядных токах около 1,15 МА. Максимальный зарегистрированный нейтронный выход составил  $1,12 \cdot 10^{11}$  н/имп при амплитуде разрядного тока 1,3 МА.

3. На установке КАСКАД определена зависимость индуктивности разрядной камеры от времени, которая использовалась для расчета конструкции взрывного размыкателя тока, способного обеспечить в предстоящем взрывном эксперименте заданную форму импульса напряжения на входе плазмофокусной камеры.

## Литература

1. Mather J. W., Bottoms P. J. // Phys. Fluids. 1968. Vol. 11, N 3. P. 611–618.
2. Веретенников А. И., Даниленко К. Н. Средства диагностики однократного импульсного излучения. М.: 1999.
3. Власов Н. А. Нейтроны. М.: 1955.

# РАЗРАБОТКА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОННОГО ЗАПУСКА ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Б. В. Цыганков, В. В. Хвостов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» создается линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-Р [1], предназначенный для использования в импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов. Для проведения экспериментальных работ по изучению и оптимизации параметров и режимов его функционирования создан ускоритель ЛИУ-Р-Т (10 МэВ,  $\leq 20$  кА, 60 нс). Для проведения современных физических экспериментов на мощном импульсном линейном ускорителе электронов с характерными временами процессов в единицы и десятки наносекунд создана скоростная многоканальная измерительная автоматизированная системы регистрации (АСР) [2], где в качестве оцифровывающих устройств используются четырехканальные регистраторы с внешним запуском TDS3034В фирмы Tektronix [3].

Учитывая особенности проводимых экспериментов, большое количество осциллографов и время регистрируемых сигналов, разрабатываемая централизованная система синхронного запуска осциллографов (ССЗ) для автоматизированной системы регистрации должна соответствовать следующим требованиям:

- гальваническая изоляция каждого осциллографа друг от друга и от запускающей системы не меньше 6 кВ;
- разброс запуска осциллографов не более  $\pm 1$  нс.

ССЗ имеет блочно-модульный принцип построения, и ее структурная схема системы приведена на рис. 1.

МПГПС генерирует пусковой импульс на одном электрическом выходе, демультиплексор оптических сигналов – выполняет функцию размножения и электрооптического преобразования. Пусковой импульс подается по персонализированным оптическим линиям связи на каждый осциллограф АСР, где впоследствии преобразовывается в электрический сигнал с помощью разработанного оптоэлектронного преобразователя. Каждый преобразователь располагается на задней панели осциллографа и подсоединяются к нему с помощью выходного BNC разъема. Питание каждого преобразователя осуществляется от своего осциллографа напряжением 15 В. Упрощенная электрическая принципиальная схема одного из каналов ССЗ изображена на рис. 2, где демультиплексор оптических сигналов – слева, оптоэлектрический преобразователь – справа.

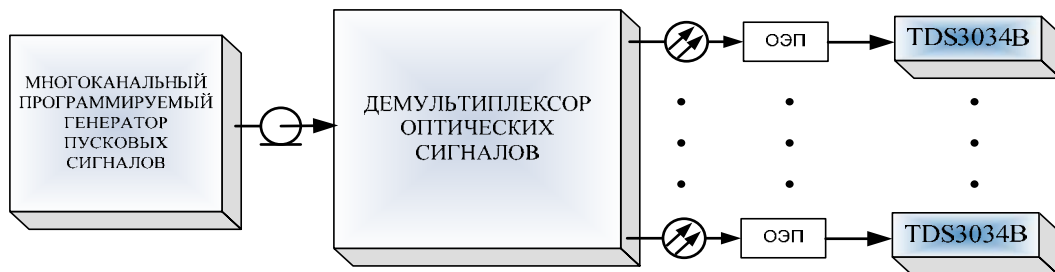


Рис. 1. Структурная схема ССЗ

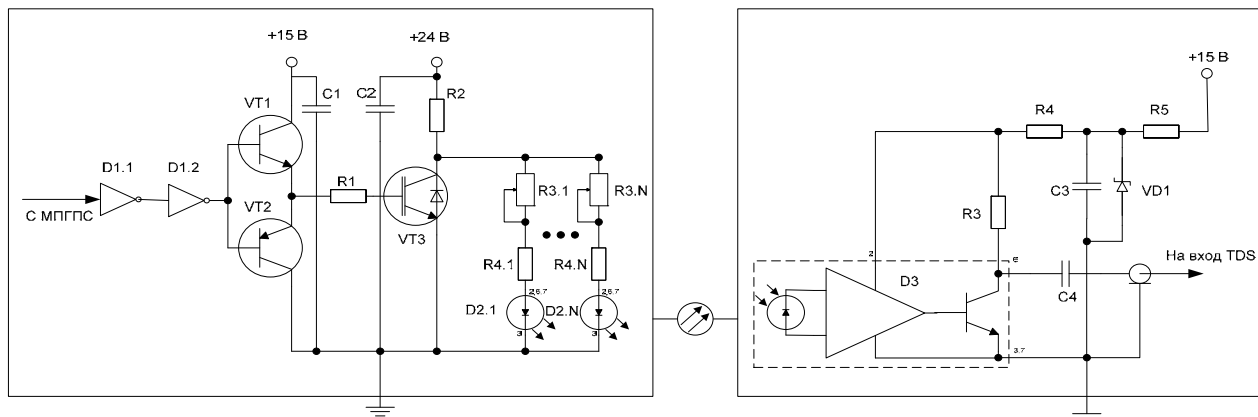


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема одного из каналов ССЗ

На схеме: D1 – микросхема K561ПУ7 для согласования сигналов разных уровней; VT1 и VT2 – комплементарная пара транзисторов; C1 и C2 – фильтрующие конденсаторы для напряжения +15 и +24 В соответственно; R1, R2 и R4 – токоограничивающие резисторы; VT3 – мощный переключающий IGBT транзистор; R3 – токозадающие резисторы; D2 – оптоволоконный передатчик HFBR1414MZ; D3 – оптоволоконный приемник HFBR2412T; R4 – токоограничивающий резистор для транзистора выходного каскада приемника; R5, R6 и C3 – фильтр для напряжения питания; R6 и VD1 – стабилизатор входного напряжения; C4 – выходной конденсатор.

В исходном состоянии на электрическом выходе МПГПС – логический «0». После микросхемы D1 на выходе второго вентиля D1.2 – логический «0». Транзистор VT1 – закрыт, база транзистора VT3 соединена с общей шиной через открытый транзистор VT2, таким образом, транзистор VT3 закрыт и весь ток ограниченный резистором R2 поступает на передающие каскады. В зависимости от R4 и регулировочных резисторов R3.1...R3.N ток делится и поступает на светодиоды оптических передатчиков D2.1...D2.N каждого каскада. Светодиоды передатчиков излучают свечение, которое по оптоволоконным кабелям передается на фотодиоды приемников. На каждом приемнике через открытый транзистор выходного каскада приемника D3 протекает ток ограниченный резистором R4. Конденсатор C4 разряжен. На входе внешнего запуска осциллографа напряжение 0 В.

С приходом фронта нарастания стартового импульса с МПГПС на выходе второго вентиля D1.2 – логическая «1» напряжением 15 В. Транзистор VT2 – закрывается, а ток через открывающийся транзистор VT1 ограниченный резистором R1 поступает на базу транзистора VT3, который впоследствии открывается, пропуская через себя весь ток ограниченный резистором R2 на общую шину. Светодиоды в передатчиках D2.1...D2.N прекращают свечение. Транзистор выходного каскада приемника D3 закрывается и начинается процесс зарядки конденсатора C4. При длительности стартового импульса конденсатор C4

полностью заряжается. На входе внешнего запуска осциллографа появляется постоянная составляющая питания.

С приходом фронта убывания стартового импульса схема возвращается в исходное состояние и конденсатор C4 начинает разряжаться. По фронту убывания напряжения на конденсаторе пускается осциллограф.

Измерение несинхронности срабатывания осциллографов осуществлялась по структурной схеме изображенной на рис. 3.

На первые каналы осциллографов подавался реперный сигнал частотой 100 МГц с генератора нестабильностью 5,0E-8. На второй канал одного из осциллографов был подключен пусковой сигнал после оптоэлектронного преобразователя. Временная диаграмма с этого осциллографа представлена на рис. 4, где первый канал – реперный сигнал частотой 100 МГц, второй канал – фронт убывания стартового сигнала.

Достаточно большой фронт убывания стартового сигнала позволяет путем регулирования амплитуды стартового сигнала с большей точностью настраивать синхронность запуска осциллографов. Диаграммы проверки несинхронности срабатывания осциллографов приведены на рис. 5,а,б – диаграммы реперного сигнала с первого и второго осциллографов соответственно, после срабатывания ЦССЗО, рис. 5,в – результат графического наложения одной диаграммы на другую с общей точкой в момент запуска.

Из диаграммы 5,в видно разброс запуска осциллографов не превышает  $\pm 1$  нс, что полностью удовлетворяет поставленным требованиям.

Использование ССЗ на АСР электрических параметров линейного индукционного ускорителя позволяет исключить затраты на приобретение дорогостоящего специализированного дополнительного оборудования фирмы Tektronix, не использовать в качестве пусковых сигналов оцифровывающие каналы осциллографов, гальванически развязать каждый осциллограф друг от друга и от запускающей системы.

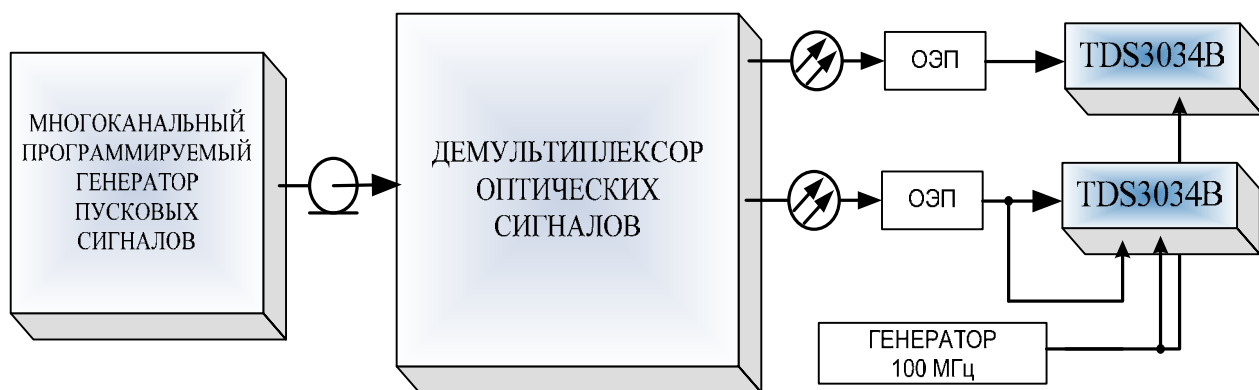


Рис. 3. Структурная схема для проверки несинхронности срабатывания осциллографов

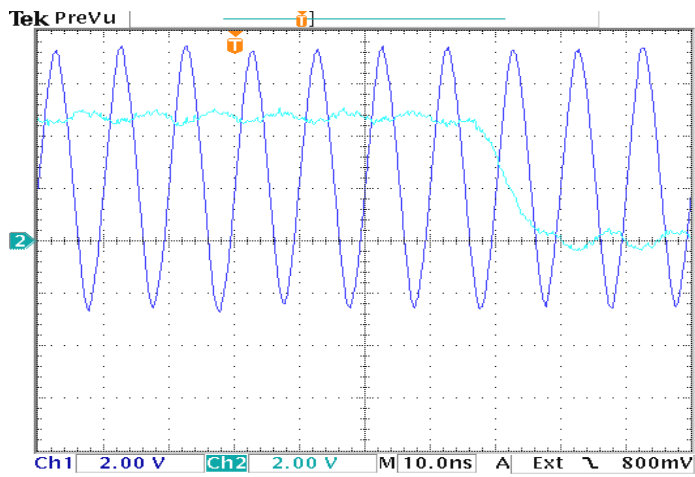
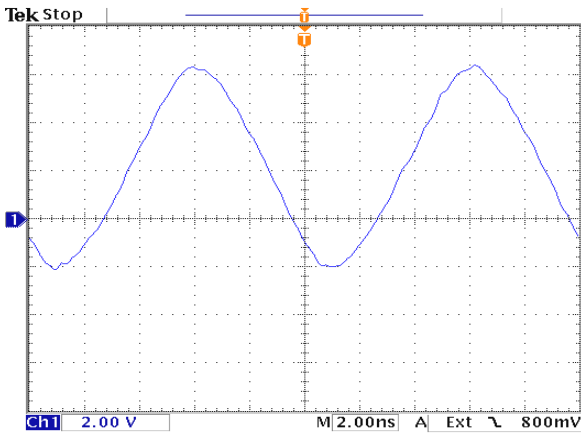
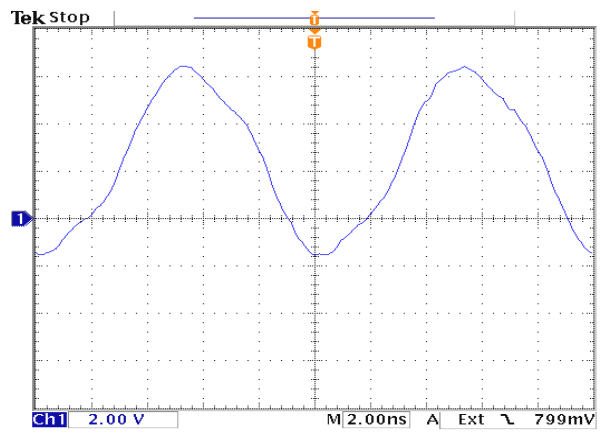


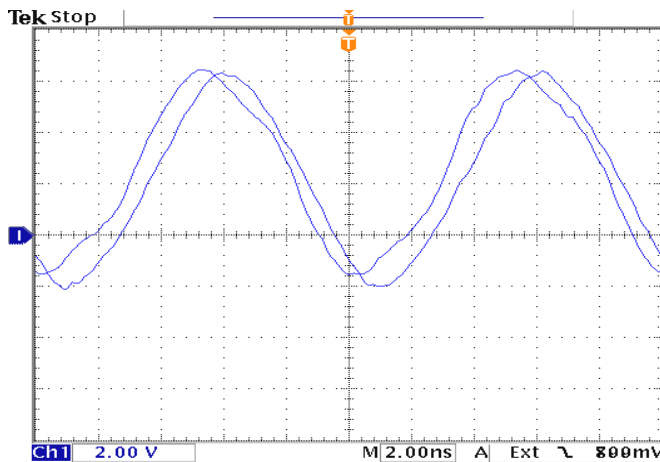
Рис. 4. Временная диаграмма работы системы запуска



а



б



в

Рис. 5. Временные диаграммы проверки разности срабатывания осциллографов (а, б, в)

## Литература

1. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S. Design of Linear Induction Electron Accelerator LIA-R. Problems of Atomic Science and Technology (Ukraine). Series: Nuclear Physics Investigations. 2006, N 2. (46). P. 40–42.
2. Цыганков Б. В., Хвостов В. В., Травкин В. В., Наумов Н. П. Автоматизированная система регист-

рации электрических параметров линейного индукционного ускорителя // Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. Н. Новгород: Гладкова О. В. 2008. Вып. 13. С. 117.

3. TDS3000&TDS3000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes. Programmer manual. Tektronix, Inc. P. O. Box 500, Beaverton, OR 97077. <http://www.tektronix.com>.

# РЕАКЦИЯ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА НА НИЗКОСКОРОСТНОЕ НАГРУЖЕНИЕ СТАЛЬНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ

А. В. Юрлов, В. А. Пушков, А. И. Абакумов, А. В. Кальманов, А. А. Седов, А. В. Родионов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Задачи исследования взрывчатых превращений во взрывчатых веществах (ВВ) при различных условиях внешнего воздействия являются весьма актуальными. В ряду этих исследований низкоскоростное механическое воздействие ( $V_{уд} = 10-100$  м/с) занимает направление, отвечающее многим практическим случаям (нагрузки технологические, транспортировочные, аварийные, при диверсиях, и др.). Однако из-за сложности процесса взрывчатого превращения на сегодня нет полных данных об условиях его инициирования. Не существует и достаточно подтвержденных моделей физических процессов, приводящих к инициированию взрывчатых превращений при низкоскоростных воздействиях. Положение осложняется тем, при таких воздействиях, как правило, возникает низкоскоростное взрывчатое превращение, которое распространяется со скоростями в несколько раз меньше скорости нормальной детонационной волны и которое зависит от многих до конца не выясненных факторов.

Широко используемое модельное представление строится на выводе, что наиболее вероятным механизмом инициирования взрывчатых превращений является образование очагов реакции в результате диссипации энергии при пластической деформации в твердых ВВ со сдвиговыми деформациями, приводящее к образованию трещин и относительному скольжению материала ВВ по границе трещины [1].

Исследования взрывчатых превращений при низкоскоростном механическом воздействии активно проводятся во РФЯЦ-ВНИИЭФ с 70-годов прошлого века. Исследования проводились при воздействии на ВВ пули, сферического осколка [2], плоских

ударников, цилиндрического ударника с полусферическим торцом, стрелы Гопкинсона [3]. Получаемые результаты подвергаются численному моделированию с удовлетворительным согласием расчетных и экспериментальных данных, например [3].

В ряду различных низкоскоростных механических воздействий на ВВ кроме воздействия небольших осколков и плоских ударников возможно воздействие элементов в виде штыря или протяженного ударника.

В настоящем докладе представлены методика и некоторые результаты экспериментального исследования реакции полусферических образцов (наружный диаметр  $\sim 100$  мм) из флегматизированного октогена [4] на низкоскоростное механическое воздействие стального ударника при скорости удара  $V_{уд} = 55-75$  м/с. В опытах для регистрации процесса внедрения ударника в образец ВВ применялся радиоинтерферометр.

## 1. Постановка опытов

На рис. 1 показана схема постановки эксперимента.

С помощью энергии взрыва заряда специального ВВ снаряд-ударник разгоняется по стволу пушки (внутренний диаметр ствола 52 мм) и ударяет по полусферическому образцу по линии полюс полусферы – центр опорного кольца – центр отверстия трубы. Опорное кольцо закреплено на трубе-динамометре. Деформации образца и трубы регистрируются тензодатчиками. Тензодатчики на полусферическом образце располагались на внешней поверхности на расстоянии 30, 50 и 70 мм от полюса. Во время опыта с помощью электроконтактных датчиков, находящихся вблизи размещения образца ВВ, регистрировалась скорость ударника. Применялся стальной ударник

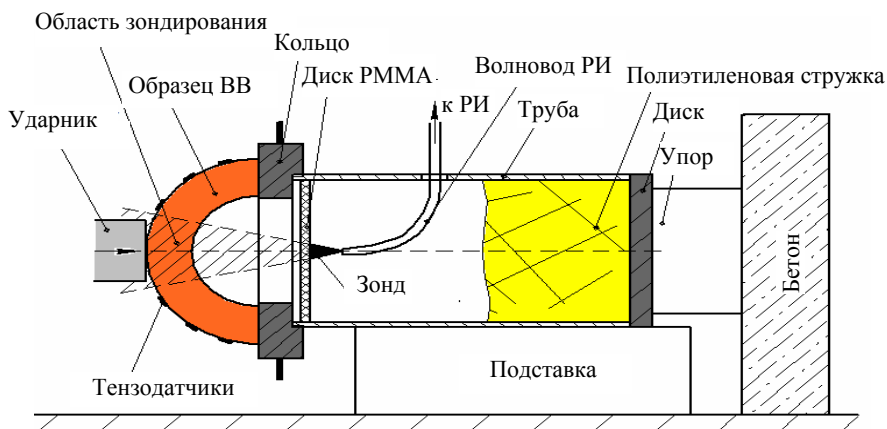


Рис. 1. Схема постановки опытов с использованием радиоинтерферометра  $\varnothing 52 \times 175$  мм. Усилие  $P(t)$ , действующее на полусферический образец, измерялось датчиками на опорной



## 2. Результаты экспериментов

трубе-динамометре. Во время опыта процесс полета ударника и его начальное внедрение в полусферический образец регистрировались с помощью радиоинтерферометра (РИ-03). Зонд РИ крепился в трубе-динамометре на глубине ~10 мм от торца трубы, где устанавливалось кольцо, и зондировал изнутри полусферы движение объектов с плотностью, отличающейся от плотности воздуха.

Радиоинтерферометр представляет собой приемопередающее устройство миллиметрового диапазона длин волн, передатчик которого выдает в линию передачи непрерывный немодулированный гармонический сигнал, а приемник выполняет квадратурное фазовое детектирование принятого из этой линии сигнала. Это означает, что приемник имеет два выхода, выходные сигналы на которых соответствуют уравнениям

$$U_1(t) = A(t) \cos \varphi(t); \quad U_2(t) = A(t) \sin \varphi(t),$$

где  $A(t)$  – амплитудный множитель, величина которого определяется мощностью сигнала, пришедшего на приемник, а  $\varphi(t)$  – фазовый сдвиг между переданным и принятым сигналами. Выделение параметров движения объекта выполняется двумя способами: фазо-временным (для восстановления закона движения ударника  $x(t)$  и  $V(t)$ ) и частотно-временным (для расшифровки интерферограммы с шумами).

Исходя из получаемых сигналов в указанных опытах с движущимися объектами с помощью радиоинтерферометра РИ-03 можно определять скорость ударника от начала его движения до соударения и некоторого внедрения в полусферу ВВ. Кроме этого можно регистрировать начало разлета полусферы на фрагменты или (в случае взрывчатого превращения) движение продуктов взрыва.

Опыты проведены при скоростях ударника 55, 61, 75 м/с. В опыте при 55 м/с не наблюдалось взрывчатого превращения, образец разрушился на фрагменты. В опытах при 61 и 75 м/с происходило взрывчатое превращение практически всего объема ВВ с образованием небольшого количества мелкой пыли и непрореагировавшего ВВ.

После обработки сигналов РИ одного из опытов при  $V_{уд} = 55$  м/с на рис. 2 приведена диаграмма движения ударника (до соударения с образцом ВВ) в координатах скорость-время. При этом скорость ударника перед соударением хорошо согласуется с величиной скорости, полученной по электроконтактной методике ( $V_{уд} \sim 53$  м/с).

На рис. 3 в координатах скорость объекта-время представлена расшифровка радиоинтерферограммы опыта при  $V_{уд} = 55$  м/с, а на рис. 4 – опыта при  $V_{уд} = 75$  м/с (где происходило взрывчатое превращение).

Из рис. 3 и 4 видно, что после соударения появляются два объекта движения. Первым объектом является ударник, скорость которого после удара немного снизилась. Вторым объектом на рис. 3, очевидно, является отколовшийся от внутренней поверхности полусферы фрагмент ВВ, который начал двигаться с большей, чем у ударника скоростью ( $V \sim 90$  м/с). Аналогичная картина наблюдалась и в опыте с идентичным по геометрии образцом, но из инертного состава, имеющего близкую к испытуемому ВВ прочность. Вторым же объектом на рис. 4, наиболее вероятно, являются продукты взрыва, которые за ~0,1 мс приобретают скорость ~700 м/с. Аналогичные данные были получены и в опыте

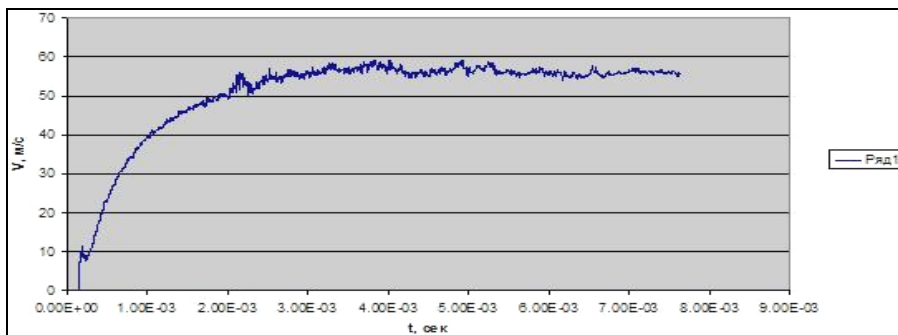


Рис. 2. Скоростная диаграмма движения ударника до соударения с образцом при  $V_{уд} = 55$  м/с (опыт без взрывчатого превращения)

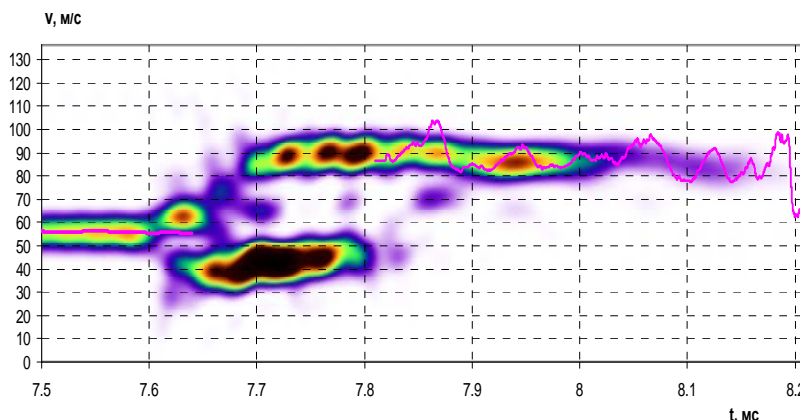


Рис. 3. Диаграмма: скорость движения объекта-время в опыте при  $V_{уд} = 55$  м/с (без взрывчатого превращения)



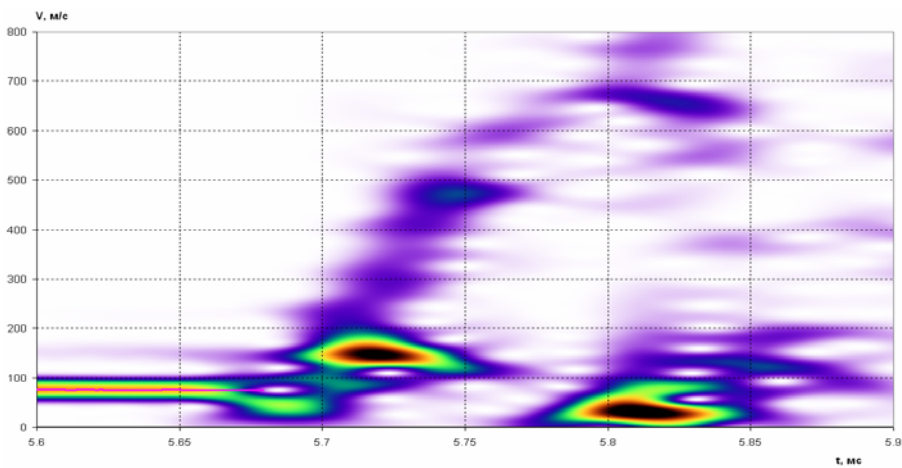


Рис. 4. Диаграмма: скорость движения объекта-время в опыте при  $V_{уд} = 75$  м/с (опыт со взрывчатым превращением)

при  $V_{уд} = 61$  м/с, где продукты взрыва также за  $\sim 0,1$  мс приобрели скорость  $\sim 600$  м/с.

Зарегистрированные тензодатчиками до разрушения или взрывчатого превращения ВВ величины деформаций на внешней поверхности полусферических образцов в опытах составляли 0,6–1,5 %. Величины усилий на трубе-динамометре  $P(t)$  составили от 40–50 кН в начале взрывчатого превращения до 150–160 кН в процессе развитого взрывчатого превращения. Невысокие значения усилий можно объяснить разгрузкой образующегося давления в воздух. Совместный анализ результатов по тензоизмерениям и радиоинтерферограмме показал, что к моменту возникновения взрывчатого превращения ударник в этих опытах внедрился в полусферу на глубину  $\sim 1,5$ –2 мм. При этом процесс взрывчатого превращения происходит с низкой скоростью, так как часть ВВ остается непрореагировавшим и поэтому присутствуют следы пыли и остатки на опорном кольце.

### Заключение

С применением радиоинтерферометра в вышеописанной постановке определены количественные данные условий начала возникновения взрывчатого превращения флегматизированного октогена и кинематики движения продуктов взрывчатого превращения. При  $V_{уд} = 61,0$ –75 м/с к началу превращения ударник внедрился в полусферу на глубину 1,5–2 мм. При этом образующиеся продукты взрыва за 0,1 мс приобретают скорость 600–700 м/с. В начале взрывчатого превращения усилие достигает всего 40–50 кН, а в процессе развитого взрывчатого превращения усилие увеличивается лишь до  $\sim 150$  кН, что связано с тем, что на фоне процесса разрушения ВВ и одновременного взрывчатого превращения преобладает разгрузка образующегося давления в воздух.

Во всех случаях взрывчатого превращения оставались непрореагировавшие остатки ВВ, что говорит о низкоскоростном характере превращения. Это подтверждает сложный характер возникновения взрыв-

чатого превращения в ВВ, которое требует своего дальнейшего исследования.

Представленные данные, полученные с помощью радиоинтерферометра и тензоизмерений, будут полезны при разработке расчетных моделей деформирования и инициирования взрывчатого превращения октогена. Это позволит моделировать поведение ВВ при воздействии различных нагрузок.

### Литература

1. Belov G. V., Gushanov A. R., Isheev D. M., Khvorostin V. N., Volodina N. A. Numerical simulation of experiments on the low-velocity impact on octogen-based HE using the explosive transformation initiation kinetics // Abstracts of 7<sup>th</sup> International Meeting on New Models and Hydrocodes for Shock Waves Processes in Condensed Matter. Estoril, Portugal. 2008. P. 37–38.
2. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Глушихин В. В., Дякин Е. П., Еременко А. С., Екимчев С. Н., Игошина С. Г., Костюков Е. Н., Шишканов А. В., Шустова Н. И. О влиянии предварительного механического повреждения образцов ВВ на параметры взрывчатого превращения и величину пороговой скорости инициирования детонации при ударе осколком // Труды IX Харитоновских чтений. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 187–192.
3. Абакумов А. И., Большаков А. П., Васенин С. Н., Гушанов А. Р., Синицын В. А. Расчетно-экспериментальное исследование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения в опытах с составным стержнем Гопкинсона // Труды IX Харитоновских чтений. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 215–226.
4. Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н., Михайлов А. Л., Комиссаров В. В., Седов А. А. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ // Труды XI Харитоновских чтений. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 69–73.

# **СЕКЦИЯ 3**

## **Инженерные науки**

Председатели секции:

И. И. Коротков

д-р физ.-мат. наук В. С. Нефедов

---

---

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Д. В. Акимов, Е. А. Осоченко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Создание надежных, высокоточных акселерометров требует от силочувствительных резонаторов, являющихся составной частью датчиков, стабильности метрологических характеристик при действии различных внешних дестабилизирующих факторов.

В процессе изготовления пьезоэлемента первичного преобразователя ускорения с силочувствительным пьезоэлектрическим кварцевым резонатором на стенках и в углах конструкции образуются клинья травления. При образовании дефектов изготовления в зонах роста клиньев травления могут возникать концентраторы напряжений, приводящие в условиях внешних дестабилизирующих факторов к нарушению целостности конструкции пьезоэлемента.

В рамках данной работы проведены исследования первичного преобразователя в нелинейных режимах работы силочувствительного резонатора, в условиях воздействия повышенного (в сравнении с штатным режимом работы) напряжения возбуждения, и предложен способ выявления скрытых дефек-

тов силочувствительных пьезоэлектрических резонаторов.

Исследования проводились для двух вариантов конструкции первичного преобразователя.

В результате проведенных исследований определены:

- изменение эквивалентных параметров силочувствительных резонаторов (резонансной частоты, динамического сопротивления, добротности);
- уровень напряжения возбуждения, при котором происходит необратимое изменение указанных выше параметров;
- зависимости временного дрейфа частоты резонаторов до и после воздействия повышенного напряжения возбуждения.

Результаты изменений характеристик резонаторов от величины напряжения возбуждения  $U_g$  с амплитудой от 2,3 В до 8,5 В приведены в табл. 1–2 и на рис. 1–4.

Таблица 1

№ образца	Вариант конструкции	$U_g, В$	$f_{рез}, Гц$	$Q$	$R_k, кОм$
7	1	2,3	285579,1	5800	735
		2,8	285579,6	5850	
		5,3	285582,8	5600	
		8,5	285563,0	-	
		2,3	285562,0	6250	
12	1	2,3	284133,3	5950	945
		2,8	284133,6	6050	
		5,3	284136,5	6100	
		8,5	284114,4	-	
		2,3	284112,6	-	
15	1	2,3	284093,6	5900	715
		2,8	284094,3	5530	
		5,3	284097,5	5900	
		8,5	284080,0	-	
		2,3	284069,5	-	
16	1	2,3	284145,2	5550	600
		2,8	284145,8	5450	
		5,3	284150,5	5050	
		8,5	284132,0	-	
		2,3	284122,8	-	
					800
					690

№ образца	Вариант конструкции	$U_{g,B}$	$f_{рез}, Гц$	$Q$	$Rk, кОм$
11	2	2,3	282627,1	5550	1100
		2,8	282627,4	5550	
		5,3	282629,0	5400	
		8,5	282631,1	4850	
		10	282632,6	4600	
		2,3	282625,3	5000	1150
14	2	2,3	283360,9	5830	885
		2,8	283361,3	5950	
		5,3	283364,0	6000	
		8,5	283349,3	-	
		2,3	283344,8	4410	950
17	2	2,3	287519,4	5450	835
		2,8	287519,7	5500	
		5,3	287520,8	5650	
		8,5	287496,4	-	
		2,3	287491,2	-	890
18	2	2,3	286643,1	5500	870
		2,8	286643,5	-	
		5,3	286644,4	4350	
		8,5	286627,0	-	
		2,3	286624,1	-	935

Таблица 2

№ образца	$f_{рез}, Гц$						
	$U_{возб.}, B$	2,3	2,8	5,3	8,5	2,3	$\Delta f_{рез2}, Гц$
7		285579,1	285579,6	285582,8	285563,0	285562,0	-16,1
12		284133,3	284133,6	284136,5	284114,4	284112,6	-18,9
15		284093,6	284094,3	284097,5	284080,0	284069,5	-13,6
16		284145,2	284145,8	284150,5	284132,0	284122,8	-13,2
11		282627,1	282627,4	282629,0	282631,1	282625,3	4,0
14		283360,9	283361,3	283364,0	283349,3	283345,2	-11,6
17		287519,4	287519,7	287520,8	287496,4	287491,2	-23
18		286643,1	286643,5	286644,4	286627,0	286624,1	-16,1

$\Delta f_{рез1}$  – изменение резонансной частоты от исходного значения при напряжении возбуждения с внешнего генератора  $U_g = 8,5$  В амплитудного значения.

$\Delta f_{рез2}$  – изменение резонансной частоты от исходного значения при напряжении возбуждения с внешнего генератора  $U_g = 2,3$  В амплитудного значения после воздействия напряжения возбуждений  $U_g = 8,5$  В.

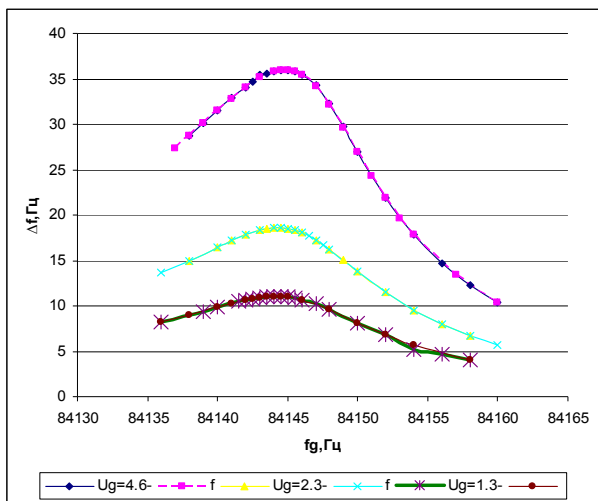


Рис. 1. График измерений АЧХ конструкция № 1. Образец № 16 до воздействия напряжения возбуждения  $U_g = 8,5$  В

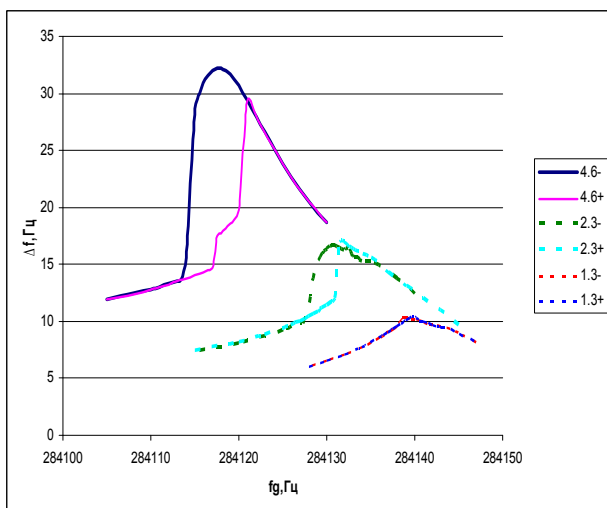


Рис. 2. График измерений АЧХ конструкция № 1. Образец № 16 после воздействия напряжения возбуждения  $U_g = 8,5$  В

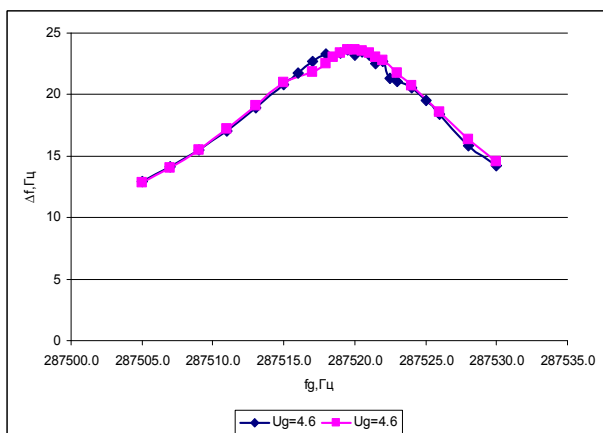


Рис. 3. График АЧХ конструкция № 2. Образец № 17 до воздействия  $U_g = 8,5$  В

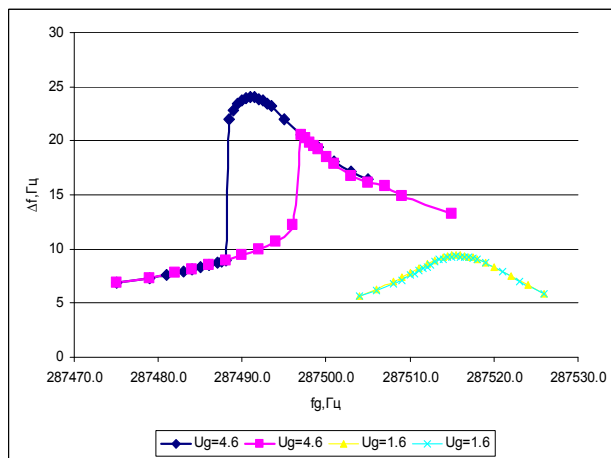


Рис. 4. График АЧХ конструкция № 2. Образец № 17 после воздействия  $U_g = 8,5$  В

Результаты изменения дрейфа частоты представлены в табл. 3 и на рис. 5–8.

Таблица 3

№ образца	Вариант конструкции	$\Delta f_1$ , Гц	$\Delta f_2$ , Гц
7	1	0,01	0,07
12	1	0,01	0,025
15	1	0,025	0,2
16	1	0,01	0,16
11	2	0,01	0,015
14	2	0,007	0,1
18	2	0,035	0,115

$\Delta f_1$  – значение дрейфа частоты до воздействия напряжением возбуждения амплитуды  $U_g = 8,5$  В.

$\Delta f_2$  – значение дрейфа частоты после воздействия напряжением возбуждения амплитуды  $U_g = 8,5$  В.

Результаты измерений частоты автогенерации после воздействия напряжения возбуждения  $U_g = 8,5$  В приведены в табл. 4.

Таблица 4

№ образца	Вариант конструкции	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц	$f_1 - f_2$ , Гц
7	1	285581,0	285563,6	17,356
12	1	284134,7	284108,9	25,770
15	1	284095,6	284070,6	25,065

№ образца	Вариант конструкции	f1, Гц	f2, Гц	f1-f2, Гц
16	1	284147,6	284118,9	28,636
11	2	282629,3	282628,6	0,691
14	2	283362,8	283348,3	14,502
18	2	286645,6	286625,9	19,670

$f_1$  – значение частоты автогенерации до воздействия напряжением возбуждения амплитуды  $U_g = 8,5$  В.

$f_2$  – значение частоты автогенерации после воздействия напряжением возбуждения амплитуды  $U_g = 8,5$  В.

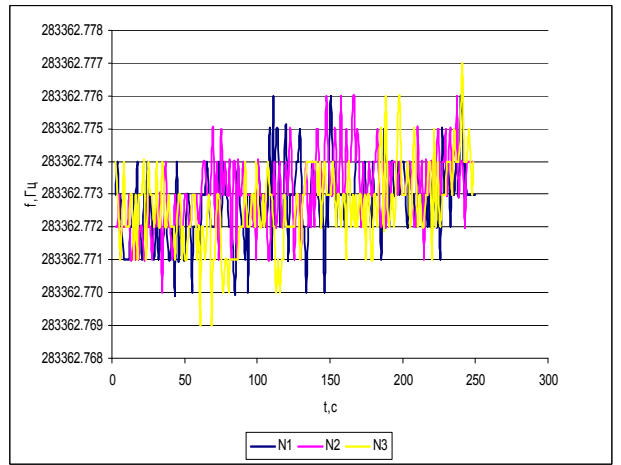


Рис. 7. График дрейфа частоты образца № 14, конструкция № 2 до воздействия напряжением возбуждения  $U_g = 8,5$  В

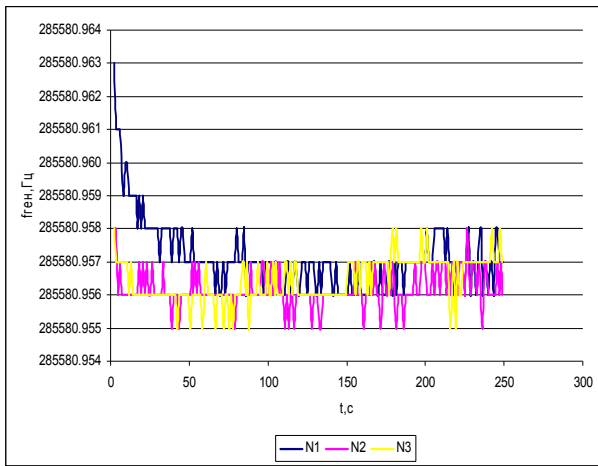


Рис. 5. График дрейфа частоты образца № 7, конструкция № 1 до воздействия напряжением возбуждения  $U_g = 8,5$  В

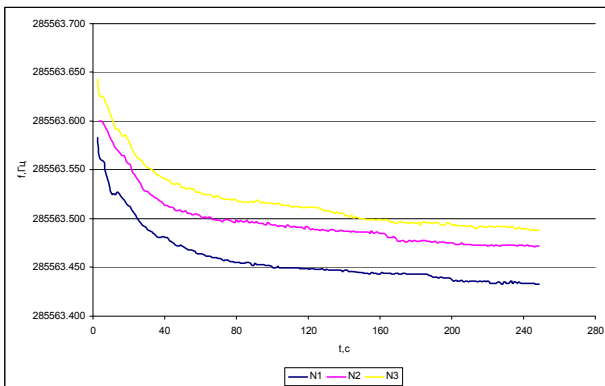


Рис. 6. График дрейфа частоты образца № 7, конструкция № 1 после воздействия напряжением возбуждения  $U_g = 8,5$  В

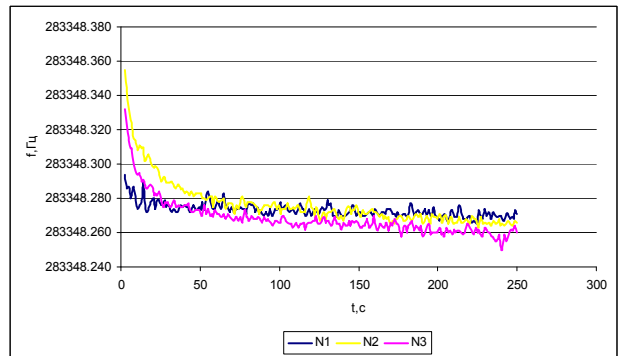


Рис. 8. График дрейфа частоты образца № 14, конструкция № 2 после воздействия напряжением возбуждения  $U_g = 8,5$  В

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. При воздействии на систему напряжением возбуждения с амплитудой  $U_g = 2,3$  В (рис. 1, 3) изменения АЧХ обратимы, при увеличении амплитуды возбуждения до  $U_g = 8,5$  В АЧХ становится нелинейной (рис. 2, 4) и необратимой, растет величина неизохронности (зависимость периода вынужденных колебаний от амплитуды возбуждения).

2. Дрейф частоты после воздействия напряжением возбуждения с амплитудой  $U_g = 8,5$  В увеличивается, а частота автогенерации уменьшается.

3. По результатам проведенных исследований рекомендуется производить отбраковку резонаторов при их изготовлении по критерию изменения частоты автогенерации более  $\pm 1$  Гц после воздействия на них напряжением возбуждения с амплитудой  $U_g = 4,5$  В на резонансной частоте.

4. В процессе изготовления пьезоэлемента на стенках и в углах конструкции образуются клинья травления. При образовании дефектов изготовления в зонах роста клиньев травления могут возникать

концентраторы напряжений, приводящие к нарушению целостности конструкции пьезоэлемента.

С целью улучшения метрологических характеристик акселерометра, необходимо изготавливать резонаторы без клиньев травления в области перехода в акустические пробки с применением плазмохимического или комбинированного (жидкостного и плазмохимического) способа травления, с последующим проведением исследований резонаторов по описанной методике.

## Литература

1. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л.: «Энергия», 1970.
2. Ленк А. Электромеханические системы. М.: «Мир», 1978.
3. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: «Энергоатомиздат», 1989.



# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК, ПОДВЕРГНУТЫХ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОМУ СОСТОЯНИЮ

К. А. Бобреев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Методика определения механических свойств  $\delta$ -стабилизированного плутония непосредственно на полусферических деталях ОЗ-Т при их гидравлическом нагружении разработана в КНИО РФЯЦ-ВНИИЭФ. Для реализации методики спроектировано, изготовлено и испытано на оболочках из материала-имитатора «Устройство для определения свойств материала при гидростатическом нагружении тонкостенных оболочек» (получено решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2009134584/28(048695)). Однако построение диаграммы деформирования при равномерном плоском растяжении возможно только при наличии высокоточной автоматизированной измерительной системы. Имевшиеся в наличии измерительные системы, применяемые для построения диаграмм деформирования при одноосном растяжении образцов, для решения данной задачи не пригодны вследствие недостаточной точности, поскольку линейные деформации при сложнонапряженном нагружении вдвое меньше, чем при одноосном. Указанное обстоятельство обусловило

начать разработку высокоточной измерительной системы. Был проведен анализ существующих измерительных систем, по результатам которого можно отметить, что аналогичных измерительных комплексов, по крайней мере, во ВНИИЭФ не существовало, а конструкции разработанных датчиков измерения относительной деформации уникальны.

Блок-схема измерительного комплекса, разработанного КНИО, представлена на рис. 1.

Сбор и первичная обработка экспериментальной информации выполняется с помощью специально разработанного в КНИО программного пакета Meridian.

Экстензометр (датчик удлинения), изображенный на рис. 2, состоит из собственно датчика линейного перемещения дифференциально-трансформаторного типа (Schaevitz MHR 025) и рычажного механизма, преобразующего линейное перемещение игольчатых опор в перемещение сердечника датчика. В качестве опоры в этом механизме использован упругий шарнир, выполненный в виде балки постоян-

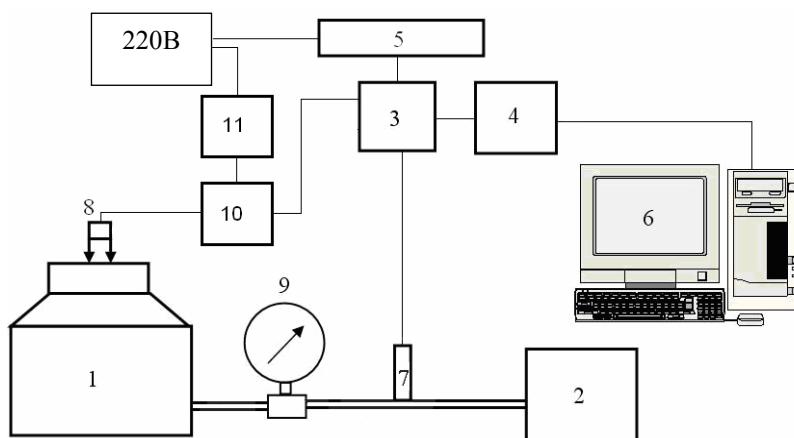


Рис. 1. Блок-схема комплекса для испытания оболочек при гидростатическом нагружении: 1 – установка для гидростатического нагружения оболочек; 2 – насосная станция (рабочее давление до 70 МПа); 3 – блок обработки информации; 4 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП L-CARD E-270); 5 – источник питания с выходным напряжением 24В; 6 – ЭВМ; 7 – датчик давления Schaevitz P9061; 8 – экстензометр (датчик измерения относительного удлинения); 9 – эталонный манометр; 10 – тензоусилитель (в случае применения экстензометра на основе тензорезисторов); 11 – источник питания с выходным напряжением 5В

ного сечения. Первичная обмотка датчика линейного перемещения Schaevitz MHR 025 запитывается переменным синусоидальным напряжением  $U = 3$  В с частотой 5 кГц.

Упругий шарнир обеспечивает безлюфтовое перемещение рычагов и значительно уменьшает погрешность измерения при малых перемещениях, что упрощает изготовление, настройку и эксплуатацию экстензометра.

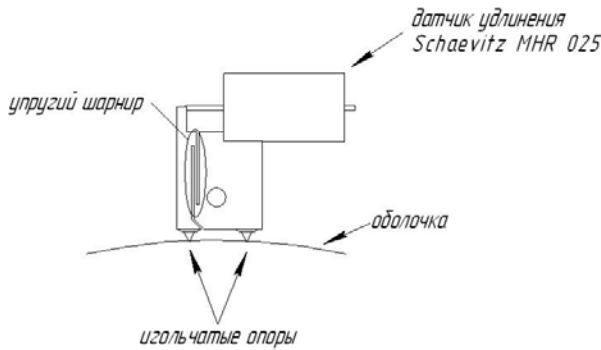


Рис. 2. Схема датчика измерения относительного удлинения на основе дифференциального трансформатора

На рычагах установлены опоры в виде конических игл, которые при испытании устанавливаются в углубления (лунки) на сферической поверхности оболочки. Для этого перед установкой экстензометра два углубления накерниваются с помощью специального шаблона на расстоянии друг от друга, равном базовой длине экстензометра. Применение игл обеспечивает практически точечный контакт с поверхностью оболочки и значительно уменьшает влияние трения. Поджатие игл датчика измерения деформации к испытываемой оболочке осуществляется при помощи груза цилиндрической формы. Деформация оболочки сопровождается изменением расстояния между иглами и соответствующим поворотом рычагов в упругом шарнире. Угловое перемещение рычагов преобразуется в поступательное перемещение сердечника датчика (Schaevitz MHR 025) и в соответствующее пропорциональное изменение выходного электрического сигнала. В результате измеряется относительная деформация базовой хорды, эквивалентная относительной деформации сегмента оболочки, опирающегося на данную хорду. Измерительный диапазон указанного экстензометра составляет 0,4 мм.

С целью увеличения измерительного диапазона был разработан кардинально новый датчик измерения относительной деформации с использованием тензорезисторов. Он состоит из рычажного механизма, преобразующего линейное перемещение игольчатых опор в пропорциональный изгиб упругого элемента, и приобретенных тензорезисторов КФ5П1-5-200-Б-12 номиналом 200 Ом. В качестве опоры в этом механизме использован упругий шарнир, выполненный в виде балки постоянного сечения.

Для измерения деформации, возникающей при изгибе упругого элемента, используются тензорезисторы, соединенные по мостовой схеме и наклеенные как изображено на рис. 4. Для повышения чувствительности экстензометра тензорезисторы наклеивались на внутреннюю и внешнюю поверхности упругого элемента. Схема соединения тензорезисторов представлена на рис. 3.

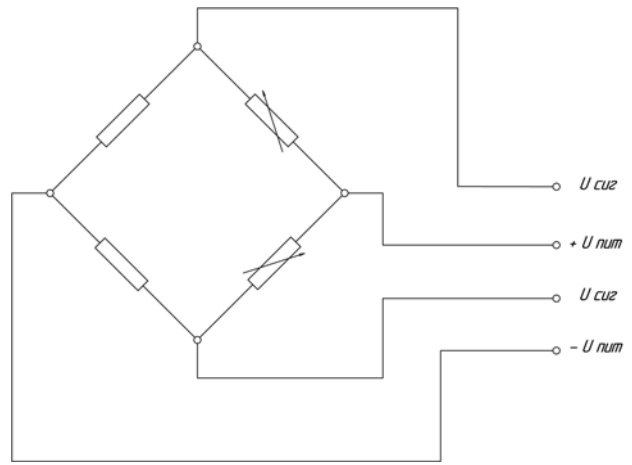


Рис. 3. Мостовая схема соединения тензорезисторов КФ5П1-5-200-Б-12

Упругий шарнир обеспечивает безлюфтовое перемещение рычагов и значительно уменьшает погрешность измерения при малых перемещениях, а также упрощает изготовление, настройку и эксплуатацию экстензометра.

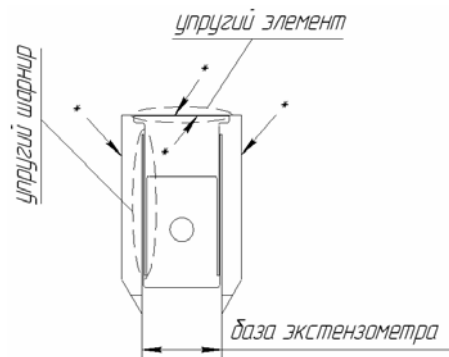


Рис. 4. Схема и внешний вид датчика для измерения удлинения на основе тензорезисторов КФ5П1-5-200-Б-12

Рычаги основания имеют игольчатые опоры, что обеспечивает практически точечный контакт с поверхностью оболочки и значительно уменьшает влияние трения. Поджатие игл датчика измерения деформации к испытываемой оболочке осуществляется при помощи груза цилиндрической формы. Деформация оболочки сопровождается изменением расстояния между иглами и соответствующим поворотом рычагов в упругом шарнире. Угловое перемещение рычагов преобразуется в изгиб упругого элемента (с наклеенными тензорезисторами КФ5П1-5-200-Б-12) и в соответствующее пропорциональное изменение выходного электрического сигнала. В результате измеряется относительная деформация базовой хорды, эквивалентная относительной деформации сегмента оболочки, опирающегося на данную хорду.

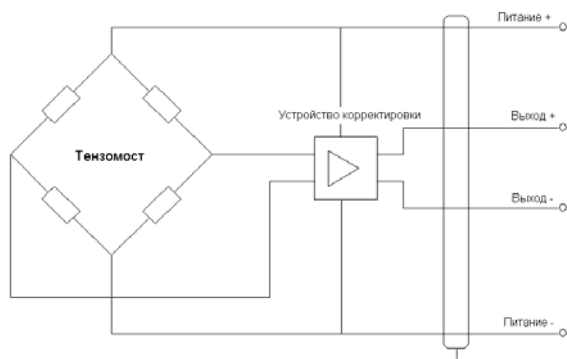


Рис. 5. Схема устройства датчика давления Schaevitz P9061

Датчик давления Schaevitz P9061 предназначен для измерения давления в диапазоне от 0 до 35 МПа при температуре окружающей среды от  $-54^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$ . Датчик состоит из тензорезисторов, соединенных по мостовой схеме, и устройства корректировки и усиления выходного сигнала с тензомоста. Для работы датчика давления не требуется обработка выходного сигнала и соответствующие электронные устройства, что значительно упрощает схему, повышает ее точность и надежность. Схема датчика давления представлена на рис. 5.

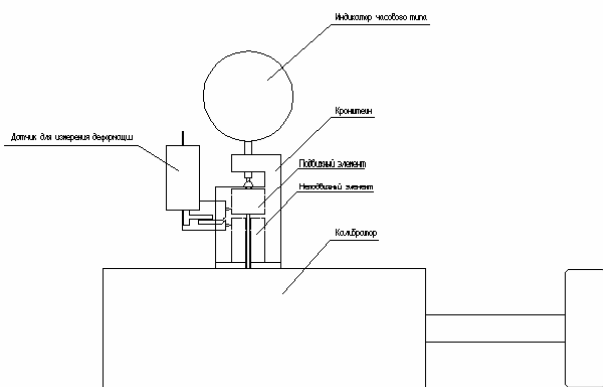


Рис. 6. Схема установки датчика для измерения деформации на универсальное калибровочное устройство

Определение характеристики датчика для измерения деформации производится на универсальном калибровочном устройстве (рис. 6), оснащённом для данной калибровки специальной оснасткой, включающей кронштейн, подвижный и неподвижный элементы и индикатор часового типа, соединённый с подвижным элементом и фиксирующим его перемещения. При калибровке одна из опор датчика устанавливается на подвижном элементе, а вторая – на неподвижном элементе в отверстия, имитирующие лунки на поверхности оболочки. Для поджима на калибровочном устройстве используются две пружины соответствующей жесткости, прижимающие датчик к подвижному и неподвижному элементам. Наличие жесткой механической связи между датчиком и индикатором часового типа позволяет отслеживать величину перемещения игл датчика. Показания датчика в виде электрического сигнала поступают на блок обработки информации, который имеет 6 каналов для датчиков деформации, 2 канала для датчиков давления Schaevitz и 1 канал для тензодинамометра. Каналы для датчиков деформации выполнены на основе микросхемы фирмы Analog Devices AD698. Функционально блок обработки информации выполняет следующее:

1. Подает на датчики напряжение возбуждения необходимой амплитуды и частоты.
2. Преобразует сигнал с датчика в постоянное напряжение, пропорциональное отклонению сердечника датчика, выполняет коррекцию и усиление сигнала.
3. Осуществляет передачу обработанных сигналов с датчиков на аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

АЦП (LCard E270) преобразует поступающие электрические сигналы с блока обработки информации в машинные коды и передает их по интерфейсу USB на персональный компьютер. На ПК при помощи программного обеспечения (Meridian) производится запись результатов эксперимента с созданием файла калибровки.

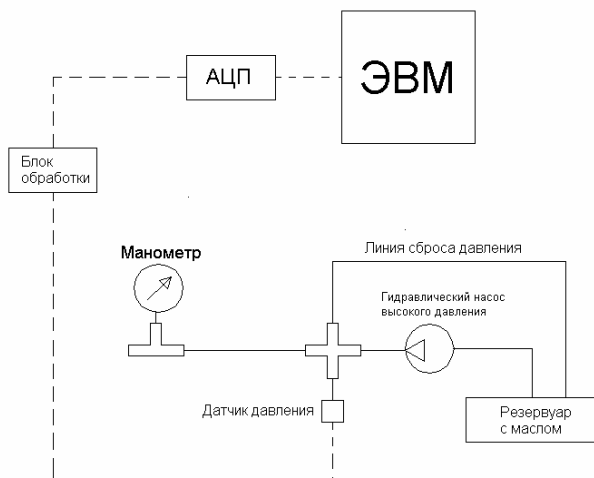


Рис. 7. Схема гидравлического калибровочного стенда для датчика давления Schaevitz P9061

Для проведения калибровки датчика давления Schaevitz P9061 был разработан гидравлический калибровочный стенд, схема которого представлена на рис. 7. Калибровка, с созданием файла калибровки, производится при помощи программного обеспечения Meridian.

Одновременно с калибровкой были исследованы основные характеристики экстензометра и датчика давления Schaevitz P9061. А именно:

- 1) линейность выходного электрического сигнала с датчиков;
- 2) наличие гистерезиса в выходных характеристиках экстензометра;
- 3) стабильность выходных характеристик (изменение тангенса угла наклона выходной характеристики от продолжительности работы измерительной системы).

При калибровке датчика измерения деформации получена выходная характеристика, представленная на рис. 8. При помощи пакета прикладных программ CRW выполнен анализ линейности полученной кривой. Отклонение полученной кривой от прямой линии составило 0,68 %. Полученное отклонение складывается из собственной нелинейности датчика, погрешности индикатора часового типа, которая для фактического диапазона измерений соответствует погрешности 0,25 % и наличием неизбежного незначительного трения в иглах.

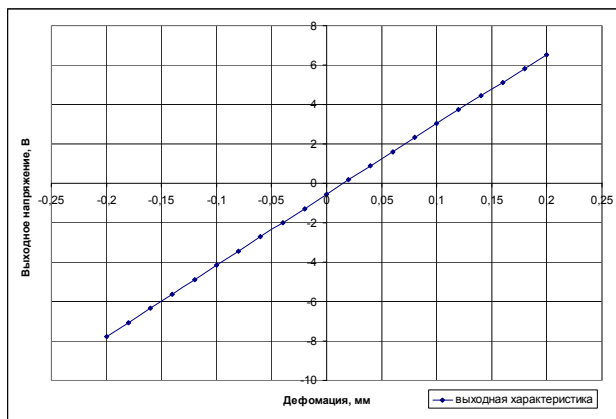


Рис. 8. Выходная характеристика экстензометра

Гистерезис (рис. 9) датчика деформации, который составляет 1 мкм при переходе нейтрального положения, выявляем путем проведения калибровки от  $-0,2$  мм (нижнего края возможного диапазона деформации) до  $0,2$  мм (верхнего края возможного диапазона деформации) и в обратном направлении с построением выходных характеристик. Полученное значение гистерезиса является достаточно низким, и обусловлено конструктивными особенностями датчиков перемещения на основе дифференциального трансформатора. Данная погрешность может проявляться только при циклических испытаниях. Так как при испытании оболочек имеет место только одно-

сторонняя деформация, наличие гистерезиса на точность измерения не влияет.

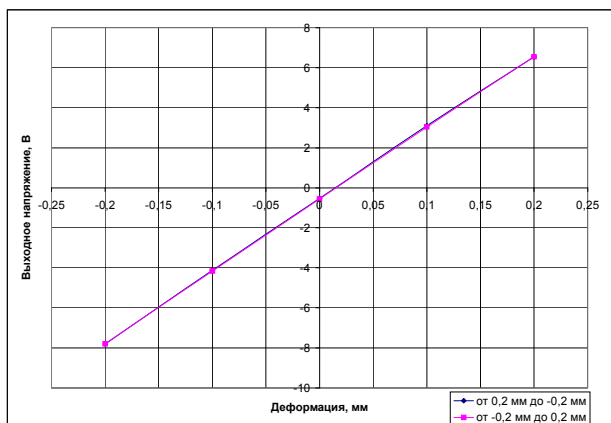


Рис. 9. Гистерезис выходных характеристик экстензометра

Для оценки стабильности выходных характеристик (т.е. изменения тангенса угла наклона выходной характеристики под влиянием прогрева аппаратуры при различной продолжительности работы измерительной системы) проведена серия калибровок с шагом по времени 5 мин. с момента подачи питания. Полученные графики представлены на рис. 10. Анализ полученных зависимостей показал, что изменение тангенса угла наклона выходных характеристик не превышает 0,16 % при различной продолжительности эксплуатации системы. Полученный результат свидетельствует о достаточно высокой стабильности характеристик измерительной системы и подтверждает правильность выбора элементной базы канала обработки информации экстензометра. В итоге, суммарная погрешность по каналу деформации составила 0,7 %.

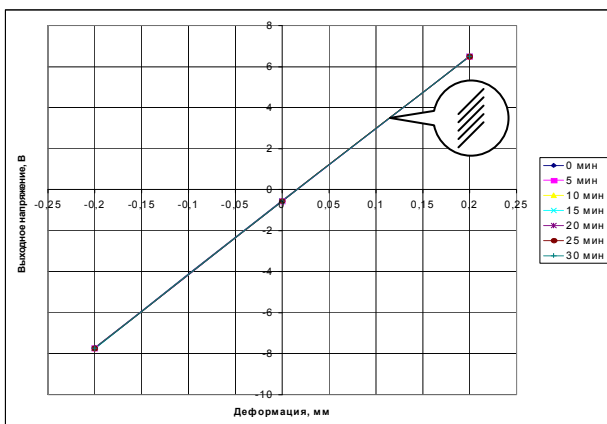


Рис. 10. Выходные характеристики экстензометра при разной продолжительности работы

После проведения калибровки датчика давления Schaevitz P9061 была получена выходная характеристика, представленная на рис. 11. Анализ полученной выходной характеристики в пакете прикладных программ CRW показал, что отклонение от линейно-

сти составляет 0,61 %. Полученное отклонение от линейности обусловлено наличием собственной нелинейности датчика давления и погрешности контрольного манометра, примененного на гидравлическом калибровочном стенде, которая составляет 0,4 %.

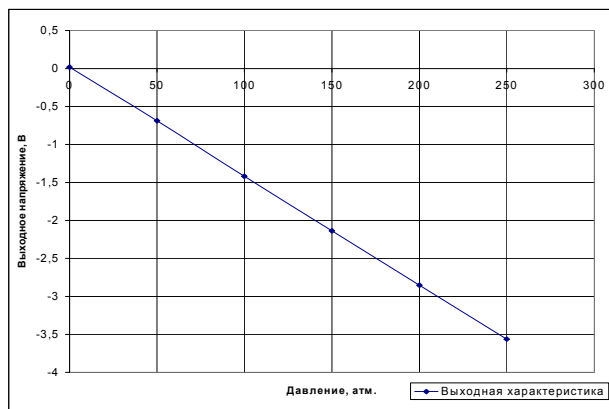


Рис. 11. Выходная характеристика датчика давления Schaevitz P9061

Для оценки стабильности выходных характеристик датчика давления (т.е. изменения тангенса угла наклона выходной характеристики под влиянием прогрева аппаратуры при различной продолжительности работы измерительной системы) проведена серия калибровок с построением выходных характеристик с шагом по времени 30 мин. с момента подачи питания. Полученные графики представлены на рис. 12. Анализ полученных выходных характеристик показал, что изменение угла наклона не превышает 0,56 % при различной продолжительности работы. Суммарная погрешность по каналу давления составила 0,83 %.

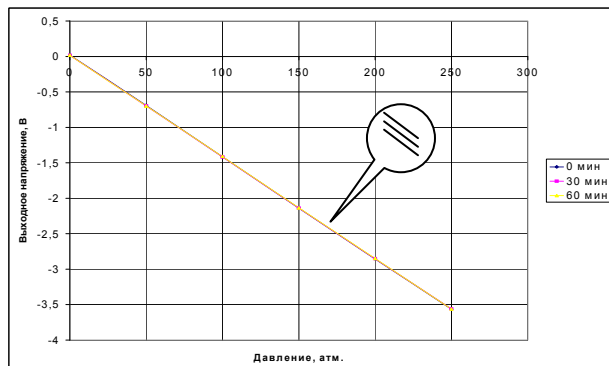


Рис. 12. Выходные характеристики датчика давления Schaevitz P9061 при разной продолжительности работы

По итогам проведенных исследований суммарная погрешность измерительного комплекса составляет 1,08 %, что значительно меньше по сравнению с погрешностью измерительных систем, применяемых при аналогичных исследованиях до настоящего времени.

## Литература

1. Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х., Этингоф М. И. Тензометрия в машиностроении. М.: Машиностроение. 1975.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа. 2001.
3. Зайцев С. А., Грибанов Д. Д., Толстов А. Н., Меркулов Р. В. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. М.: Издательский центр «Академия». 2008.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

*И. М. Бураков, А. А. Плаксеев, М. М. Григорьев, Н. А. Подпорина*

ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва

## Введение

Система пассивного отвода тепла (СПОТ) является защитной системой безопасности, основанной на пассивном принципе действия, обеспечивающей отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реакторной установки (РУ) через второй контур при потере всех источников переменного тока на атомной электрической станции (АЭС) и отказе системы аварийного расхолаживания парогенераторов (САР).

Система пассивного отвода тепла должна выполнять свою функцию в любых климатических условиях, в том числе при скоростях ветра до ураганных значений.

## Конструкция системы

Схема компоновки СПОТ на герметичной оболочке АЭС Куданкулам представлена на рис. 1.

Система состоит из контуров естественной циркуляции, образующих 4 канала СПОТ – по одному на каждый парогенератор. Каждый канал включает в себя три теплообменных модуля, трубопроводы пароконденсатного тракта с арматурой, тракт воздухопроводов, воздушные затворы и регулирующие устройства.

Согласно принятым проектным характеристикам оборудования, трех каналов СПОТ достаточно для осуществления системой своих функций в полном объеме.

В каждом канале СПОТ пар от парогенератора (2) по трубопроводу парового тракта (3) поступает в три теплообменника (6). В теплообменниках (6) пар конденсируется, отдав тепло охлаждающему воздуху. Далее конденсат по трубопроводам конденсатного тракта (4) возвращается в парогенератор.

Охлаждение пара в теплообменниках осуществляется атмосферным воздухом. Охлаждающий воздух забирается из атмосферы вне оболочки здания. Воздух за счет естественной тяги поступает в кольцевой коллектор (КК) (5), расположенный вокруг оболочки здания. Затем по индивидуальным воздухопроводам воздух поступает на теплообменники (6). В теплообменниках (6) охлаждающий воздух отбирает тепло от пара и поступает в тяговые участки воздухопроводов (9), которые заканчиваются общим коллектором (10) с дефлектором (11).

Одним из факторов, способных повлиять на работу СПОТ, является действие ветра, которое может привести к неравномерности течения воздушного потока в воздуховодах и, следовательно, к неравномерному отводу тепла теплообменниками СПОТ. Для исключения этого влияния СПОТ оснащена следующими конструктивными элементами: кольцевым входным воздушным коллектором (5), общим выходным коллектором (10) с дефлектором (11), воздушными затворами (7) и регулирующим устройством (8).

Поступление атмосферного воздуха в кольцевой входной коллектор осуществляется через щелевые отверстия, расположенные в его нижней части. Все указанные конструктивные элементы предназначены для создания одинаковых гидродинамических условий на входе и выходе воздушных трактов, в которых расположены воздушные теплообменники СПОТ. Расположение и геометрические размеры всех указанных элементов (щелевых отверстий, входного кольцевого коллектора, выходного коллектора с дефлектором) выбраны на основании проведенных экспериментальных исследований внешней аэродинамики главного здания АЭС.

## Ветер

Ветер представляет собой горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности и характеризуется направлением и скоростью.

Для освещения ветрового режима района АЭС «Куданкулам» рассчитаны и приведены характеристики ветра по данным двухсрочных наблюдений опорных метеорологических станций Каньякумари и Тривандрум, а также по данным, полученным с кораблей, проходящих вблизи побережья (1969–1989 гг.). Средняя скорость ветра в теплый период года 3,4 м/с, в холодный – 5,2 м/с, за год – 4,4 м/с.

Чаще всего наблюдаются ветры скоростью 1–3 м/с. На ветры скоростью 15–20 м/с приходится от 9,7 % в апреле до 48,3 % от всех случаев в январе.

Специалистами Заказчика рекомендуется принимать значения расчетных максимальных скоростей ветра повторяемостью раз в 10000 лет, равными 55 м/с, повторяемостью раз в 1000 лет – 46 м/с [1].

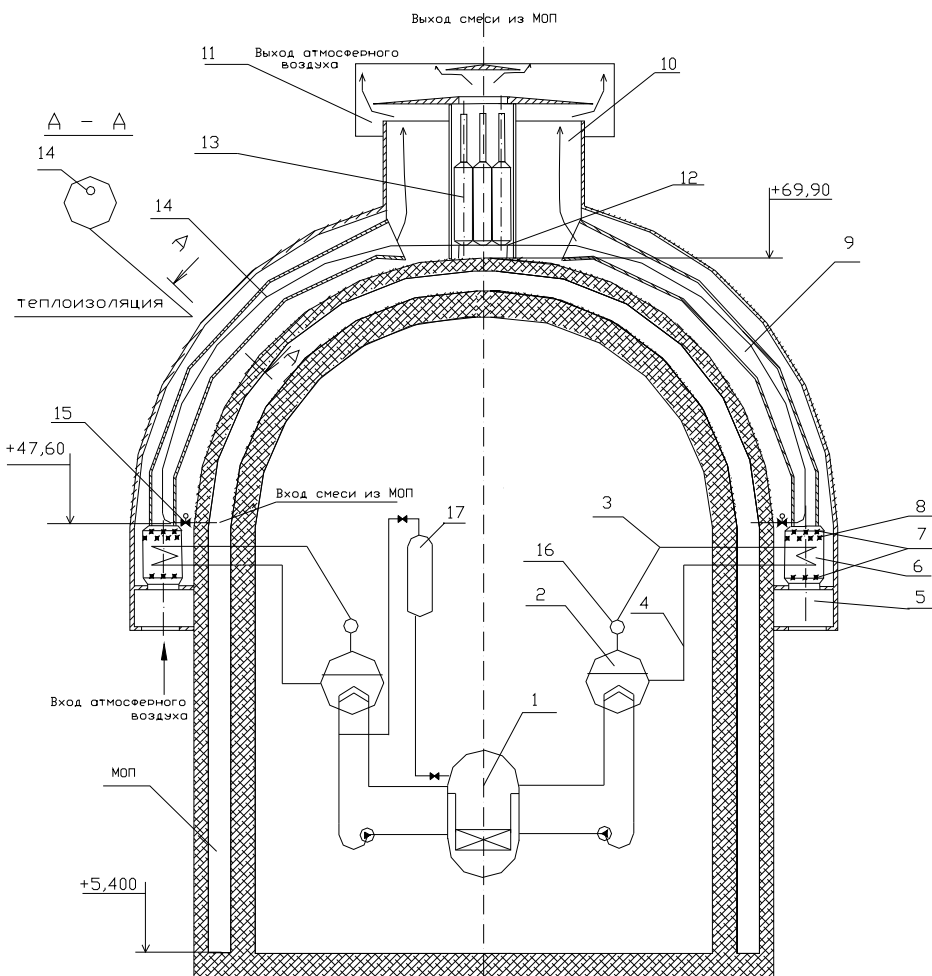


Рис. 1. Схема системы пассивного отвода тепла:

1 – РУ; 2 – парогенератор; 3 – паровой тракт; 4 – конденсатный тракт; 5 – входной КК; 6 – теплообменник СПОТ; 7 – воздушные затворы; 8 – регулирующие устройства; 9 – тяговая шахта СПОТ; 10 – выходной коллектор СПОТ; 11 – дефлектор; 12 – сборный коллектор фильтровальной установки; 13 – фильтровальная установка ПСФ; 14 – теплообменник ПСФ; 15 – задвижка запорная; 16 – паровой коллектор; 17 – гидроемкость ДСПЗАЗ

### Описание расчетной схемы

Расчетная схема СПОТ представлена на рис. 2.

Участки 1–2; 3–4; 5–6; 7–8; моделируют щелевые отверстия. Участки 2–4; 4–6; 6–8; 8–2, моделируют кольцевой коллектор, участки 2–9; 4–9; 6–9; 8–9, моделируют каналы СПОТ, участок 9–10 моделирует выходной коллектор.

В проведенном расчете приняты следующие граничные условия:

Давление в ПГ: 6,27 Мпа.

Температура атмосферного воздуха : 41,5 С°[1].

Атмосферное давление: 0,098 Мпа.

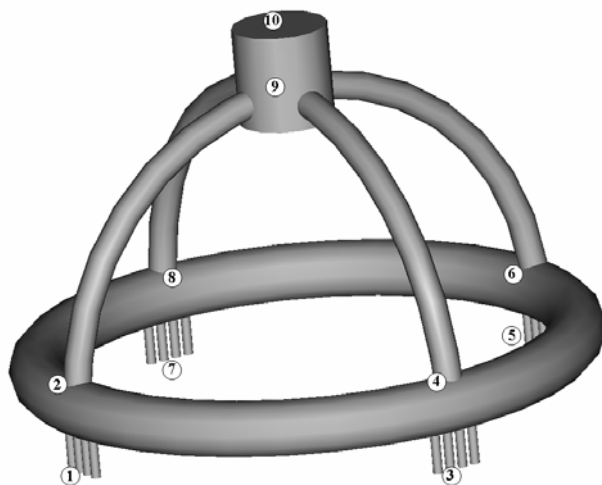


Рис. 2. Расчетная схема системы пассивного отвода тепла



В табл. 1 приведены результаты расчета для различных скоростей ветра, где  $P_{1i}$  – избыточное давление воздуха перед щелевым отверстием,  $P_{2i}$  – избы-

точное давление воздуха на входе в теплообменник,  $i$  – номер канала СПОТ.

Таблица 1

Характеристики каналов системы при различных скоростях ветра

Скорость ветра 0 м/с															
Канал № 1 (точки 1, 2, 9)				Канал № 2 (точки 3, 4, 9)				Канал № 3 (точки 5, 6, 9)				Канал № 4 (точки 7, 8, 9)			
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
22,85	119,66	0	-99	22,85	119,66	0	-99	22,85	119,66	0	-99	22,85	119,66	0	-99
Скорость ветра 5 м/с															
Канал № 1 (точки 1, 2, 9)				Канал № 2 (точки 3, 4, 9)				Канал № 3 (точки 5, 6, 9)				Канал № 4 (точки 7, 8, 9)			
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
25,02	133,71	14	-79	24,99	133,56	-8	-80	25,09	134,24	-5	-78	24,99	133,56	-8	-80
Скорость ветра 10 м/с															
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
29,17	161,82	54	-44	29,11	161,68	-33	-45	29,38	163,61	-19	-41	29,11	161,67	-33	-45
Скорость ветра 25 м/с															
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
43,32	305,89	399	206	42,96	305,18	-203	206	43,16	312,93	-119	229	42,96	305,18	-203	206
Скорость ветра 30 м/с															
Канал № 1 (точки 1, 2, 9)				Канал № 2 (точки 3, 4, 9)				Канал № 3 (точки 5, 6, 9)				Канал № 4 (точки 7, 8, 9)			
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
46,53	367,05	488	336	46,03	365,65	-293	366	46,50	375,21	-171	368	46,03	365,69	-293	336
Скорость ветра 55 м/с															
N, МВт	G, кг/с	$P_{11}$ , Па	$P_{21}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{12}$ , Па	$P_{22}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{13}$ , Па	$P_{23}$ , Па	N, МВт	G, кг/с	$P_{14}$ , Па	$P_{24}$ , Па
56,05	706,44	1641	1318	54,63	694,99	-985	1318	54,77	714,20	-574	1428	54,63	695,00	-985	1318

## Характер движения воздуха в кольцевом коллекторе

На рис. 3 показан характер движения воздуха в КК при скоростях ветра от 5 до 55 м/с, в табл. 2 указаны расходы воздуха в соответствующих участках КК для различных скоростей ветра.

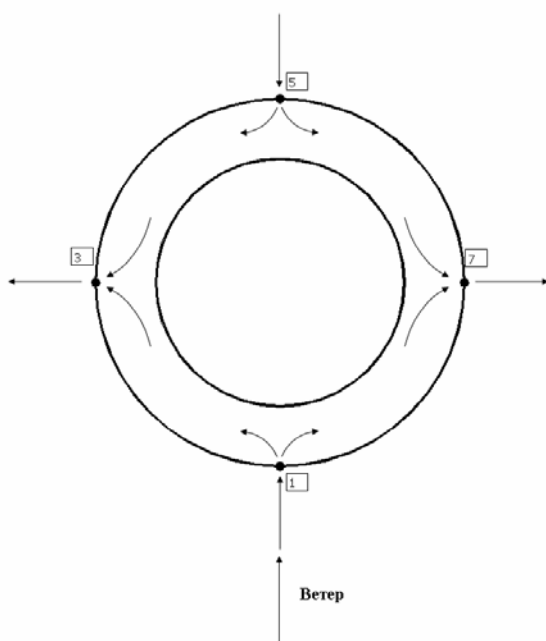


Рис. 3. Характер движения воздуха в кольцевом коллекторе

Из табл. 1 видно, что в результате действия ветра, обтекающего контеймент, с фронтальной (рис. 3 точка 1) стороны образуется область повышенного давления, а с тыловой (рис. 3 точка 5) и боковых (рис. 3 точки 3 и 7) стороны образуется область разрежения. В точках 1 и 5 воздух заходит в кольцевой коллектор (из-за разрежения преимущественно в т. 5), в точках 3 и 7 воздух выходит из кольцевого коллектора. Несмотря на разницу давления (обусловленную влиянием ветра) перед щелевыми отверстиями давление перед теплообменниками в разных каналах практически не отличаются. Таким образом кольцевой коллектор выравнивает давление в каналах, что позволяет СПОТ выполнять свои функции в условиях ветра, со скоростями вплоть до ураганных. С возрастанием скорости ветра увеличивается расход в каналах системы, что приводит к увеличению мощности (от 91,4 МВт без ветра, до 220, 08 МВт при ветре скоростью 55 м/с).

Таблица 2

Расходы воздуха в кольцевом коллекторе при различных скоростях ветра, кг/с

Скорость ветра, м/с	Участок							
	Атмосфера – точка 1	Атмосфера – точка 3	Атмосфера – точка 5	Атмосфера – точка 7	Точка 1 – точка 3	Точка 5 – точка 3	Точка 5 – точка 7	Точка 1 – точка 7
5	337	-237	642	-237	117	254	254	117
6	366	-272	733	-272	113	297	297	113
7	362	-306	822	-306	110	339	339	110
8	362	-343	917	-343	107	384	384	107
9	364	-380	1015	-380	105	429	429	105
10	369	-419	1117	-419	106	475	475	106
15	404	-613	1628	-613	101	712	712	101
25	560	-1011	2690	-1011	127	1188	1188	127
30	669	-1210	3225	-1210	151	1425	1425	151
35	783	-1409	3761	-1409	176	1661	1661	176
40	901	-1607	4304	-1607	202	1899	1899	202
55	1271	-2194	5928	-2194	282	2607	2607	282

## **Заключение**

Как видно из результатов расчета КК выравнивает давления в каналах, что позволяет СПОТ выполнять свои функции в условиях ветра вплоть до ураганных значений, мощность системы в рассмотренных режимах работы всегда больше 60 МВт (2 % номинальной тепловой мощности реакторной установки), что гарантирует необходимый отвод остаточных тепловыделений от реактора в случае аварии.

Данный расчет позволяет рассмотреть варианты улучшения геометрических характеристик бетонных конструкций системы.

## **Литература**

1. АЭС «Куданкулам» в Индии. Проект. Природные условия. Книга 6. Метеорологические условия. ФГУП АЭП. Москва, 1999.

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ 5-го ЭНЕРГБЛОКА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС В РЕЖИМЕ ПОЛНОЙ ВЫГРУЗКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ИЗ РЕАКТОРА

*Н. В. Ганьшин, М. М. Григорьев, О. Ю. Журавлева, А. А. Плаксеев, Н. А. Подпорина*

ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва

## Введение

В режиме перегрузки ядерного топлива отвод тепла от двух отсеков бассейна выдержки отработанного топлива осуществляется одним из двух каналов системы охлаждения бассейна выдержки (БВ). В настоящее время в рамках проведения мероприятий по модернизации 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС рассматривается возможность охлаждения топлива в бассейне спринклерной системой, что может обеспечить вывод одного из каналов системы охлаждения бассейна выдержки в плановый ремонт. Цель настоящей работы – оценка возможности охлаждения бассейна выдержки спринклерной системой и подготовка предложений по ее модернизации.

## Постановка задачи

Рассматривается эксплуатационное состояние, соответствующее режиму с полной выгрузкой ядерного топлива из реактора в бассейн выдержки. Уровень борного раствора в бассейне выдержки соответствует отметке +35,700, при этом объем воды в бассейне составляет 825 м<sup>3</sup>. Отвод остаточных тепловыделений от ТВС, находящихся в бассейне, осуществляется каналом системы охлаждения БВ. На рис. 1 показана упрощенная схема системы охлаждения БВ.

Усредненные значения тепловыделения в зависимости от времени, отсчитываемого от момента выгрузки ядерного топлива, приведены в табл. 1. На 25-е сутки значение энерговыделения стабилизируется и для рассматриваемого периода времени практически не меняется. Требуется оценить время, в течение которого возможен вывод в ремонт одного канала системы безопасности (СБ). В течение этого времени в случае отказа работающего канала системы охлаждения БВ отвод тепла от БВ должен обеспечиваться спринклерной системой.

Таблица 1

Усредненные значения энерговыделения в БВ после выгрузки ядерного топлива

Время, сут.	Мощность, МВт
2	14,2
5	9,13
10	6,69
15	5,47
20	4,75
25	4,29

Расчетная схема системы охлаждения БВ спринклерным насосом через теплообменник системы аварийного охлаждения зоны низкого давления (САОЗ НД) приведена на рис. 2. Рассматривается один канал спринклерной системы. Вода забирается из БВ через трубопровод с задвижкой БВ-23. Далее через задвижку АР-41 вода поступает на всас спринклерного насоса АСН-1, по линии рециркуляции подается для охлаждения в теплообменник ТОАР-1 и, далее, по трубопроводу с задвижкой АС-111 и обратным клапаном АС-631 возвращается в БВ.

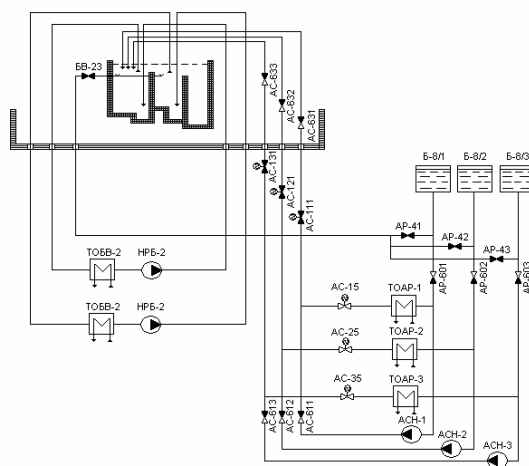


Рис. 1. Упрощенная схема системы охлаждения бассейна выдержки

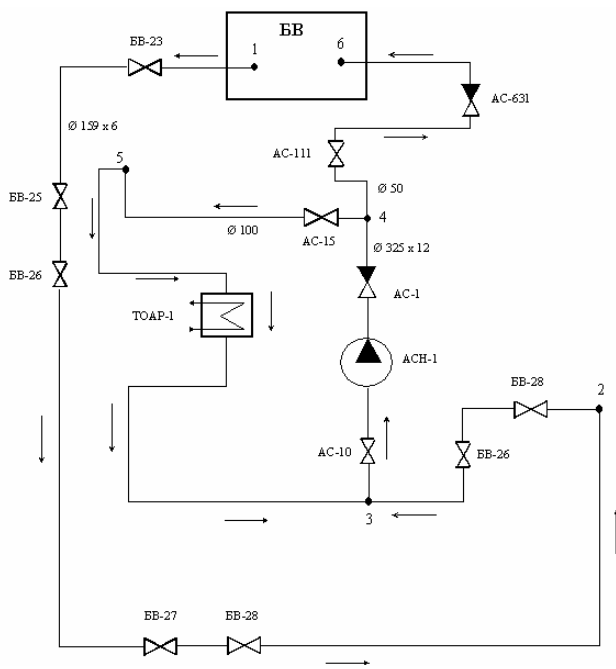


Рис. 2. Расчетная схема системы охлаждения бассейна выдержки спринклерным насосом

### Результаты расчета

Расчет выполнен для двух значений диаметров участка трубопровода, соединяющего напор спринклерного насоса с БВ (участки 4-6) – Ду 50 и Ду 100. Результаты расчета расхода воды через БВ приведены в табл. 2. Результаты расчета показывают, что при диаметре трубопровода, соединяющего напор спринклерного насоса с БВ, равном Ду50, расход воды через теплообменник аварийного расхолаживания (ТОАР) в 19 раз выше расхода по линии охлаждения БВ. При этом температура воды на выходе из теплообменника ТОАР отличается от температуры воды, охлаждающей теплообменник, не более чем на 2,3 °С.

Таблица 2

Величина расхода через теплообменник ТОАР и БВ

Расход через теплообменник ТОАР, кг/с	Расход через бассейн выдержки, кг/с	
	Ду 50	Ду 100
214,0	11,2	54,3

В табл. 3 показана мощность, отводимая ТОАР от БВ в зависимости от температуры воды в БВ. Поскольку мощность, выделяющаяся в БВ на 25-е сутки после выгрузки топлива, больше мощности, отводимой ТОАР, то температура в БВ будет расти. На рис. 3 показано изменение температуры в бассейне выдержки при работе одного и двух каналов спринклерной системы. Видно, что при работе одного канала спринклерной системы температура в БВ достигает температуры кипения за 25 часов, а при работе двух каналов спринклерной системы полностью

обеспечивается охлаждение бассейна выдержки. В этом случае температура в бассейне не превышает 82 °С.

Таблица 3

Зависимость мощности теплообменника ТОАР от температуры воды в БВ

Температура в БВ, °С	Мощность теплообменника ТОАР, МВт	
	Ду 50	Ду 100
40	0,3	1,12
50	0,73	2,72
60	1,17	4,32
70	1,6	5,92
80	2,04	7,51
90	2,3	8,76
99,6	2,72	10,28

При использовании раствора борной кислоты, находящейся в баках аварийного запаса Б-8/1÷3, для охлаждения бассейна выдержки в режиме кипения количество борной кислоты, находящейся в каждом баке, обеспечивает охлаждение бассейна в течение 4,3 суток.

При замене участка трубопровода, соединяющего напор спринклерного насоса с БВ, с Ду 50 на Ду 100 (участок 4–6) расход воды по линии охлаждения БВ увеличивается почти в 5 раз. В этом случае один канал спринклерной системы полностью обеспечивает охлаждение БВ.

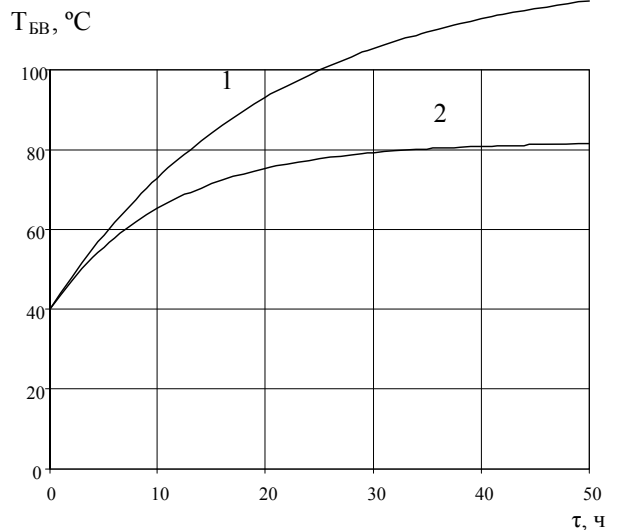


Рис. 3. Изменение температуры в бассейне выдержки при работе одного (1) и двух (2) каналов спринклерной системы в зависимости от времени

### Заключение

В докладе приведены результаты расчета охлаждения бассейна выдержки спринклерной системой

в режиме полной выгрузки ядерного топлива из реактора.

Показано, что на 25-е сутки после выгрузки топлива в бассейн выдержки использование одного канала спринклерной системы для его охлаждения обеспечивает вывод канала системы безопасности в ремонт на 25 часов, а использование двух каналов системы полностью обеспечивает охлаждение бассейна выдержки. В этом случае температура в бассейне не превышает 82 °С.

При использовании раствора борной кислоты, находящейся в баках аварийного запаса Б-8/1÷3, для охлаждения бассейна выдержки в режиме кипения количество борной кислоты, находящейся в каждом баке, обеспечивает охлаждение бассейна в течение 4,3 суток.

При замене участка трубопровода, соединяющего напор спринклерного насоса и БВ, с Ду 50 на Ду 100 один канал спринклерной системы полностью обеспечивает охлаждение БВ.

# РАЗРАБОТКА МНОГОРАЗОВОГО ВЗРЫВОЗАЩИТНОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*И. Н. Гордеев, М. А. Липатников, Р. С. Мухаметшин, А. С. Степанов, К. Н. Пермьяков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

Для проведения экспериментальных исследований особенностей динамики сферического схождения стальных оболочек с использованием лазерно-интерферометрической (ЛИМ), фотоэлектрической (ФЭМ), манганиновой и электроконтактной методик (МЭК) в РФЯЦ-ВНИИТФ разработана взрывозащитная камера ВЗК-5.

Задачи, поставленные при разработке конструкции камеры, заключались в обеспечении возможности многократно локализовать в своей внутренней полости продукты взрыва, повышении ее несущей способности и надежности при максимальном снижении массы камеры. Конструкция камеры должна обеспечить ее прочность при взрыве зарядов до 5 кг ТЭ с запасом более 1,5.

При разработке ВЗК-5 были учтены недостатки конструкции ранее разработанных взрывозащитных камер, силовые и демпфирующие элементы адаптированы под требуемые габариты и нагрузки. При этом использование методик (ЛИМ, ФЭМ) потребо-

вало подойти к разработке ВЗК-5 с принципиально новых позиций. Важным элементом данных методик являются волоконно-оптические линии (жгуты, гермопроходники), которые требуют для получения качественных результатов измерений особого подхода при обращении во время проведения монтажных работ. Кроме того, важным было не только обеспечить удобство работы с волоконно-оптическими линиями в ВЗК, но и, учитывая хрупкость материала, из которого они изготовлены, обеспечить их защиту от воздействия осколочного поля и герметичность камеры в целом после проведения взрывного эксперимента.

Чтобы обеспечить безопасность проведения взрывных экспериментов и экологическую защиту окружающей среды, потребовалась разработка и модификация устройств систем стравливания продуктов взрыва и закачки во внутреннюю полость камеры дезактивирующие, нейтрализующие или флегматизирующие вещества, устройств диагностики состояния камеры: блока контроля давления и температуры, монтажных приспособлений (рис. 1).

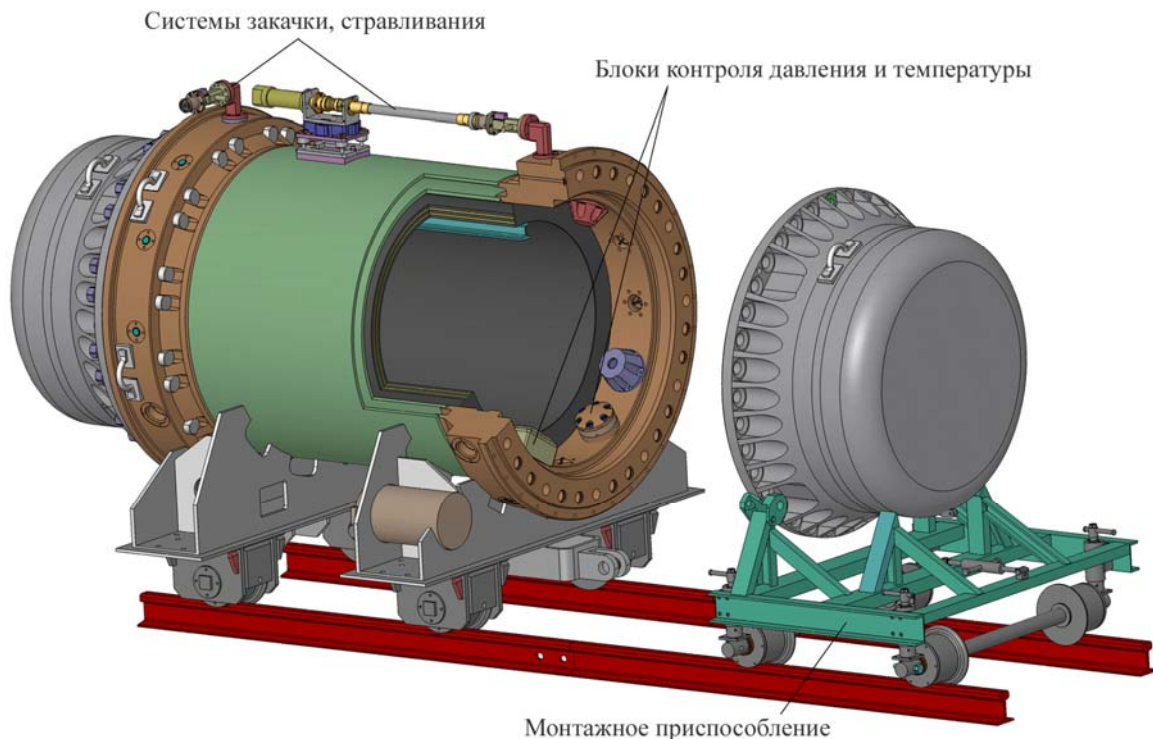


Рис. 1. Общий вид ВЗК-5



## Описание конструкции ВЗК-5

Конструкция ВЗК-5 представляет собой двух-контурный составной металлический корпус, состоящий из центральной секции и двух крышек, которые крепятся к корпусу болтами и шпильками. Главной особенностью конструкций ВЗК-5 является наличие внутренних силовых элементов, заключенных в корпусе ВЗК в виде силовой вставки и торцевых демпферов из металлической сетки. Эти элементы позволяют защитить корпус ВЗК от интенсивных взрывных нагрузок и тем самым обеспечить требуемый высокий уровень несущей способности ВЗК.

Корпус ВЗК-5 является сварной конструкцией, состоящей из двух концентрично расположенных труб, к которым приварены фланцы с обеих сторон. В каждом фланце имеется по 12 отверстий для размещения в них проходных герморазъемов (волоконно-оптических и электрических) и запорных устройств. К корпусу приварены ложементы для крепления к ним колес и опор для транспортировки ВЗК.

Внутри корпуса в центре расположена силовая вставка, которая состоит из 3-х концентрично расположенных труб толщиной 10 мм, имеющих зазор по 8 мм, который заполнен песком. Зазор между внутренней трубой корпуса ВЗК и наружной трубой силовой вставки составляет 40 мм. Внутри силовой вставки в верхней ее части приварен рельс для закатки заряда (рис. 2).

Каждая крышка ВЗК-5 представляет собой так же сварную конструкцию, состоящую из двух цельнометаллических частей – фланцевой и донной. Фланцевая часть имеет 36 отверстий для крепления к корпусу ВЗК и усиление в виде ребер. Донная часть

имеет чашеобразную форму с толщиной дна 60 мм. Внутренняя полость каждой крышки заполнена сетчатыми блоками, выполненными из сетки Рабица, для уменьшения воздействия продуктов взрыва.

Материал, используемый для изготовления ВЗК-5 – 09Г2С. Сварные швы корпуса и крышек ВЗК выполнены по II группе ОСТ95 1487-86 и проверены ультразвуковым контролем и статическим давлением маслом: крышки – на 80 кгс/см<sup>2</sup>, камера в целом – на 70 кгс/см<sup>2</sup>.

Взрывозащитная камера имеет следующие габаритные размеры:

длина – 2624 мм; высота – 1692 мм; ширина – 1592 мм; внутренний диаметр корпуса – 1040мм; наружный диаметр корпуса – 1040 мм.

Внутренний объем камеры – 1,4 м<sup>3</sup>.

Масса камеры – 5500 кг.

## Конструктивные отличия и преимущества ВЗК-5

Конструктивные отличия и преимущества ВЗК-5 от ранее разработанных ВЗК:

- размещение силовой сталепесочной вставки в центральной части с опорой на массивные фланцы позволило надежно защитить сварные швы корпуса ВЗК от прямого воздействия ударной волны и избавило от необходимости заливки бетоном межтрубно-го пространства корпуса, в результате чего значительно снижен вес камеры;

- размещение во фланцах корпуса ВЗК проходных электрических и волоконно-оптических герморазъемов для методик физизмерений позволило на-

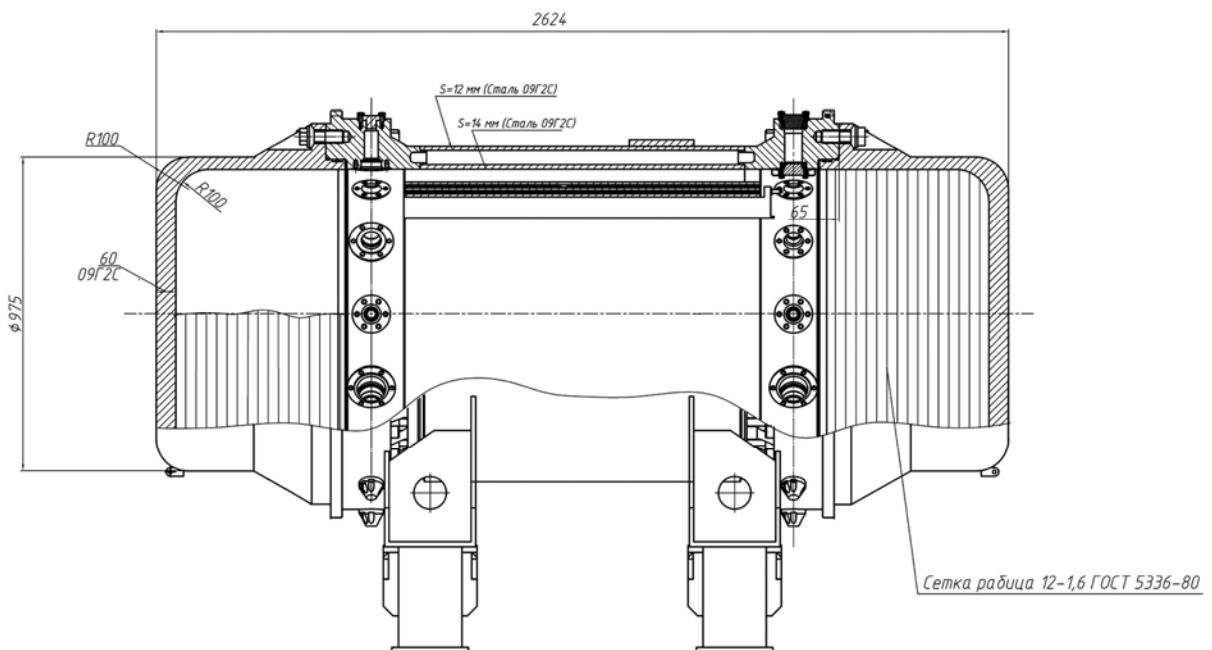


Рис. 2. Конструктивная схема ВЗК-5

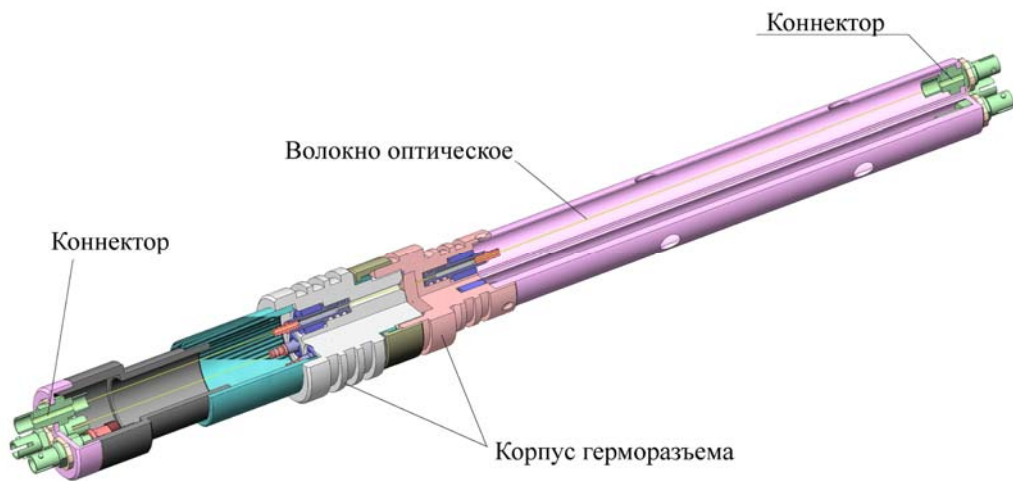


Рис. 3. Волоконнооптический герморазъем (ВОГ)

дежно защитить их от воздействия осколочного поля, тем самым обеспечить герметичность камеры и получение качественных физизмерений;

- основную нагрузку продуктов взрыва в камере воспринимают защитные и демпфирующие элементы (силовая вставка и сетчатые блоки), при этом сам корпус камеры работает в упругой области, это привело к решению выполнить защитные и демпфирующие элементы сменными и позволило в одной камере провести поочередно три взрывных эксперимента;

- число сварных швов, влияющих на несущую способность ВЗК-5, уменьшено до восьми, тогда как в камерах прежних разработок их количество доходило до нескольких десятков, данное решение повысило как прочность камеры, так и снизило трудоемкость ее изготовления;

- выполнение корпуса ВЗК составным позволило упростить работу по юстировке камеры и заряда в ней, улучшило доступ к стыкуемой аппаратуре внутри камеры, особенно, касающейся волоконно-оптической методики и появилась возможность работы с двух сторон при снятых крышках;

- выполнение в цельнометаллических фланцах необходимого количества отверстий для размещения в них электрических и волоконно-оптических проходных герморазъемов позволило избежать большого количества сварных швов, которые являются концентраторами напряжений;

- выполнение крышек ВЗК чашеобразной формы позволило снизить краевой эффект в угловой зоне, тем самым повысить прочность камеры.

### Описание конструкции волоконнооптического проходного герморазъема

Проходные волоконнооптические герморазъемы (ВОГ) предназначены для передачи (подвода и отвода) лазерного излучения от исследуемых образцов, помещенных в камеру высокого давления (ВЗК) (до

150 МПа) при сохранении герметичности на всех этапах взрывного эксперимента.

Нами разработаны несколько модификаций проходного ВОГ, которые отличаются по размеру волокна и по способу герметизации оптического волокна в корпусе герморазъема.

Проходной ВОГ представляет собой двухконтурную конструкцию, состоящую из двух последовательно расположенных корпусов, в которых размещены три оптических канала. Каждый корпус имеет свое герметичное уплотнение снаружи (в виде трех резиновых колец) и внутри в каналах размещения оптического волокна. Оптический канал представляет собой отрезок омедненного многомодового оптического волокна ( $\varnothing 0,125 \dots 0,88$  мм) на концах которого устанавливаются SMA или ST адаптеры. Проведены исследования способов герметизации оптического волокна в каналах корпуса герморазъема. Выбрано два способа герметизации: один – при помощи клея ЭЛ-20, второй – комбинированный – с применением припоя ПОС-61 и клея ЭЛ-20 (рис. 3).

На сегодняшний день проведен полный цикл отработки (статическое и взрывное нагружение) ВОГ с клеевым способом герметизации оптического волокна.

Результаты испытаний ВОГ:

статическое давление – 100 атм.;

перегрузка при взрывном нагружении – 1300 г.

Прочность и герметичность ВОГ подтверждена. Исследования с комбинированным способом герметизации продолжаются.

### Экспериментальная отработка

Согласно требованиям ПВБ-87/97 разработанная камера ВЗК-5 на несущую способность 5 кг ТЭ должна иметь запас прочности не менее 1,5.

Для подтверждения этого требования 12.10.2009 года на внутреннем полигоне проведен взрывной эксперимент с подрывом в ВЗК-5 заряда с энерговыв-

делением 8 кг ТЭ. После проведения взрывного эксперимента камера сохранила свою целостность, прочность и герметичность. Значения деформаций, зарегистрированные на наружной поверхности корпуса и крышках ВЗК-5, находились в упругой области. Силовая вставка прогнулась на 14,7 мм (зазор между вставкой и корпусом составлял 40 мм), а сетчатые блоки деформировались на 120 мм. Блок контроля давления и температуры сохранил свою работоспособность после опыта.

В результате обследования внутренней поверхности камеры, силовой вставки и сетчатых блоков пришли к заключению о возможности многоразового использования ВЗК-5 при замене силовой вставки и сетчатых блоков.

В апреле, мае 2010 г. в этой же камере после замены указанных выше элементов, проведены еще три эксперимента с подрывом зарядов с энерговыделением 4 кг ТЭ. Данные опыты проводились с целью отработки методик ЛИМ и МЭК. Результаты экспериментов признаны положительными, камера сохранила целостность и герметичность, методики получили качественную информацию.

### **Заключение**

Данная конструкция ВЗК-5 была представлена межведомственной комиссии по экологической безопасности проведения взрывных экспериментов и

получила положительные оценки. Комиссия отметила достижения в разработке ВЗК в части снижения концентраторов напряжений в конструкции, снижение влияния «человеческого фактора» на качество камеры при изготовлении, компактность, эстетичность конструкции, удобство работы и надежность обеспечения экологической безопасности при проведении взрывных экспериментов.

Комплекс конструкторских и экспериментальных работ позволяет расширить область экспериментальных исследований особенностей динамики сферического схождения стальных оболочек с использованием методик ЛИМ, ФЭМ и МЭК.

Положительным результатом разработки является то, что учтены возможности изготовления ВЗК-5 (полного цикла) на заводе №1 РФЯЦ-ВНИИТФ без привлечения сторонних предприятий. Камера для взрывного эксперимента на внутреннем полигоне была изготовлена в течение 5 месяцев.

ВЗК-5 надежно обеспечила экологическую безопасность при проведении взрывных экспериментов в РФЯЦ-ВНИИТФ в 2010 году.

Так как взрывные эксперименты на внутреннем полигоне института проводились в одной и той же камере, то можно утверждать, что в РФЯЦ-ВНИИТФ разработана многоразовая ВЗК.

На данную конструкцию ВЗК-5 подано две заявки на получение патента на изобретение.

# УСТАНОВКА И МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ ОЛОВА В ДИЭТИЛЦИНКЕ, ОБЕДНЕННОМ ПО ИЗОТОПУ $^{64}\text{Zn}$ , ДО СООТВЕТСТВИЯ ЕГО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ КАЧЕСТВА

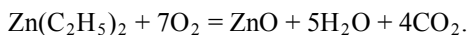
Е. Ю. Давыдов, П. Н. Кавитов, В. М. Шалин, А. И. Мудрилов, Д. А. Любимцев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

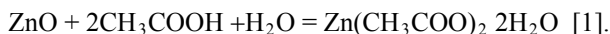
Промышленное производство оксида цинка заданной изотопной концентрации является задачей решенной, однако, на использование цинка обедненного по  $^{64}\text{Zn}$ , применяющегося на АЭС с BWR и PWR по всему миру, накладываются также требования по химической чистоте, которые год от года только ужесточаются. Обеспечение заданных параметров при производстве изотопов является первоочередной задачей, которая решалась и решается на производстве стабильных изотопов в РФЯЦ-ВНИИЭФ, что позволяет нашей продукции соответствовать самым жестким требованиям.

Диэтилцинк  $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$  служит сырьем при газоцентрифужном разделении и последующем получении либо оксида цинка, либо ацетата цинка, в зависимости от требований заказчика. Производственная схема переработки диэтилцинка (ДЭЦ) показана на рис. 1.

Оксид цинка получают сжиганием ДЭЦ в чистом кислороде (конверсия ДЭЦ в оксид):



Из порошка оксида цинка изготавливают дигидрат ацетата цинка, для чего оксид цинка обрабатывают уксусной кислотой (конверсия оксида в ацетат):



В процессе разделения природной смеси изотопов в рабочем веществе диэтилцинке (ДЭЦ) накапливаются различного рода примеси. Основными примесями, отличающимися в худшую сторону продукт, производимый нами, от зарубежного, (производитель URENCO) являются соединения олова Sn [2,3,4].

Согласно спецификации представляемой производителем (Akzo Nobel) олово в ДЭЦ не содержится. При этом анализы, проведенные в НИИХ ННГУ и ИХВВ РАН, показали наличие олова в сырье на уровне  $\approx 5$  ppm.

Основными источниками олова в ДЭЦ молекулярная масса которого 123,5 а.е.м. являются тетраметилолово (ТМО)  $\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$  и тетраэтилолово (ТЭО)  $\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ , средние молекулярные массы которых 170,754 а.е.м. и 214,798 а.е.м. соответственно. Сле-

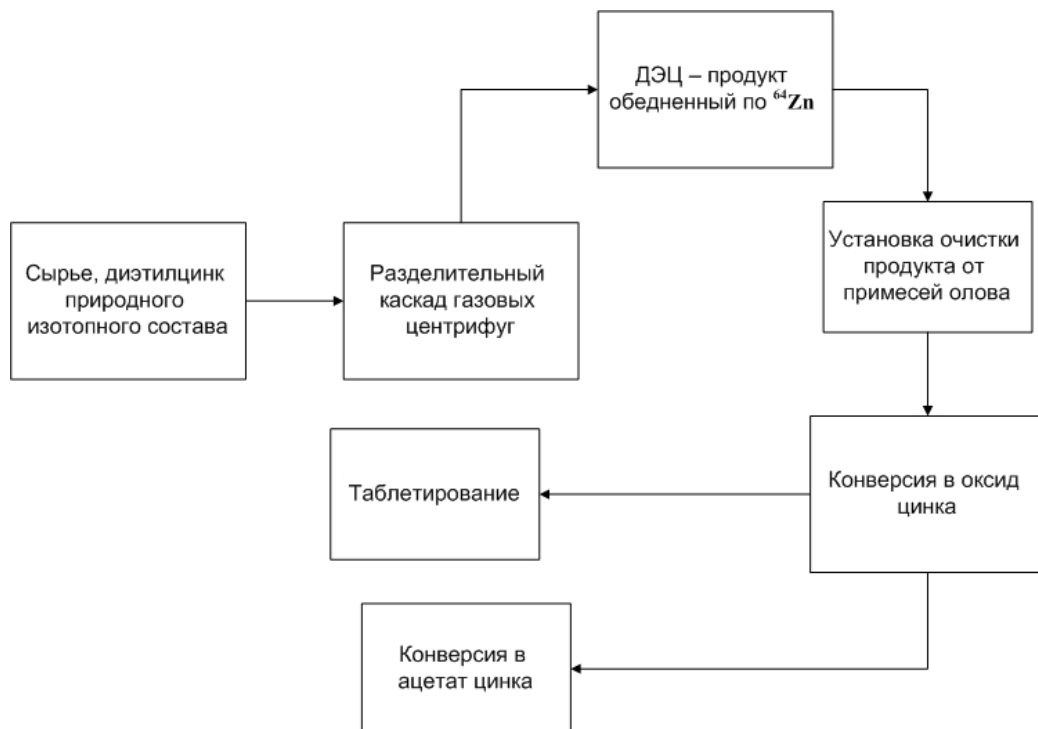


Рис. 1. Технологическая цепочка переработки диэтилцинка

довательно, накопление примесей будет происходить в потоке тяжелой фракции разделительного каскада. Принимая во внимание, факт существенного превышения молекулярных масс ТМО и ТЭО над ДЭЦ, следует ожидать, что уровень загрязнения оловом не превысит содержания его в сырье в силу конструктивных особенностей ГЦ, из которых состоит каскад. Проведенные анализы ДЭЦ обедненного по  $^{64}\text{Zn}$  до уровня менее 1% показали наличие олова 20–30 ppm в некоторых партиях на уровне 50–130 ppm. Количество примесей олова в наблюдаемых количествах не может быть обусловлено только наличием его в исходном сырье. Анализ конструкционных материалов стенда, машин и конденсационно-испарительных установок (КИУ) выявил, что в отличие от центрифуг, использующихся на разделительных заводах компании URENCO, для крепления в некоторых деталях газовых центрифуг (ГЦ) отечественного производства используется припой, в состав которого входят свинец, олово, кадмий. Таким образом, вполне предположение, что ДЭЦ загрязняется оловом именно после прохождения стенда.

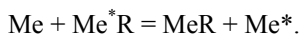
Содержание олова в продукте должно удовлетворять следующим значениям:

- ацетат цинка < 10 ppm,
- оксид цинка < 10 ppm [2,3,4].

При переводе оксида цинка в дигидрат ацетата цинка в силу особенностей технологии соединения олова в конечный продукт переходят в очень малых количествах, попадающих в диапазон заявленной химической чистоты. (При содержании Sn в оксиде  $\approx 20\text{--}30$  ppm.)

Следует отметить, что олово в продукте разделения присутствует не в чистом виде, а в форме летучих соединений, и тут самое время обратиться к теории химии органических соединений.

Одним из методов получения алкилов металлов является реакция замещения, в которой металл, связанный с органической группой замещается другим, образуя новое металлоорганическое соединение. Общее уравнение реакции:



Обычно, если М более электроположительный, чем  $\text{Me}^*$  то реакция сдвинута вправо. Т. е. реакция предпочтительно протекает в сторону образования более реакционноспособного соединения. Так как реакция обратима, то направление может быть сдвинуто в зависимости от таких факторов, как образование продуктов с различными физическими и химическими свойствами (летучесть, растворимость, склонность к образованию комплексов), конкретные условия протекания реакции (температура, давление, соотношение реагентов).

Подобные реакции используются для синтеза, в том числе и алкильных соединений цинка, олова и свинца. Источником органических групп может быть алкил любого из этих металлов.

Низшие алкилы олова являются значительно менее реакционноспособными, что согласуется с

большей электроотрицательностью олова в сравнении с цинком (1,6 для цинка, 1,8 для олова, 1,8 для свинца по Полингу). Т. е. направление реакции смещено в сторону образования металлоорганического соединения цинка из смеси металлического цинка и алкила олова. В рассматриваемом случае реакция образования алкила олова из смеси металлического олова припоя и алкила цинка сдвинута влево и образование алкила олова регулируется условиями протекания реакции и различиями в свойствах алкилов олова и цинка [1].

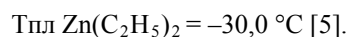
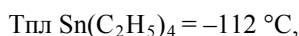
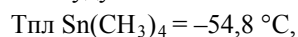
В условиях, имеющих место внутри стенда (разрежение, сверхзвуковой поток диэтилцинка в парогазовой фазе над металлическим оловом припоя, различие в температурах кипения), протекание реакции между диэтилцинком и металлическим оловом, входящим в состав припоя может быть смещено в сторону образования оловоорганического соединения, что может привести к загрязнению диэтилцинка.

В состав припоя также входит свинец. Для получения свинецорганических соединений также можно использовать алкил цинка в качестве источника органических групп. Отсутствие свинецорганических соединений в диэтилцинке, после разделения в стенде, может быть связано с тем, что свинец, также как и олово, более электроотрицателен, чем цинк (алкилы свинца менее реакционноспособны), а также с тем, что поверхность свинца из-за высокой активности покрыта оксидной пленкой в отличие от олова, что препятствует образованию органических соединений свинца.

Из вышесказанного следует, что стандартная пассивация стенда для разделения ДЭЦ оказалась недостаточно эффективной. Возникла потребность в разработке установки по очистке товарного продукта от примесей олова.

Была проведена НИР по поиску условий очистки товарного продукта и приведение его к требованиям, заявленным потребителем. Одним из способов является отмывка уже готового оксида цинка перед прессованием его в таблетки растворителями [5]. Такой метод представляется убыточным, т. к. работа с уже готовым продуктом малоэффективна и приводит к потерям. Другим способом снижения концентрации олова является использование различий в физических свойствах веществ, а именно, в разности парциальных давлений (давление паров ТЭО, ТМО и ДЭЦ при нормальных условиях составляет 1 мм. рт. ст. и 15 мм. рт. ст. соответственно), т. е. использовать ректификацию [6,7,8]. Нами, совместно с НИИХ ННГУ было разработано и внедрено другое техническое решение – низкотемпературная дистилляция под вакуумом [6].

Суть метода заключается в том, что при работе установки очистки в соответствующем температурном режиме пары ДЭЦ будут конденсироваться, а пары ТЭО и ТМО будут оставаться в газовой фазе.



В целях выбора технологического режима, на лабораторной установке проведена отработка двух температурных режимов. В качестве рабочего вещества использовался газ из одной партии. Критерием эффективности служит глубина очистки. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что эффективность очистки ДЭЦ от примесей олова заметно снижается при тем-

пературах ниже  $T_{пл} Zn(C_2H_5)_2 = -30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Очевидно, что это связано с поступлением в очищенный продукт примесей олова в форме  $Sn(CH_3)_4$  у которого  $T_{пл} = -54,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ . При этом более высокая температура ведет к снижению производительности установки.

Принципиальная схема установки показана на рис. 2.

Таблица 1

Режимы очистки

Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Масса, а.е.м.	Тип иона	Содержание примесей, ppm.		Кубовый остаток, ppm
			грязный	очищенный	
-33	177	$^{117}\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$	10	1	26
	179	$^{119}\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$	13	1	39
	234	$^{118}\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$	16	-	80
	236	$^{120}\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$	25	-	140
-60	177	$^{117}\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$	10	7	25
	179	$^{119}\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$	13	10	26
	234	$^{118}\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$	16	3	65
	236	$^{120}\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$	25	7	105

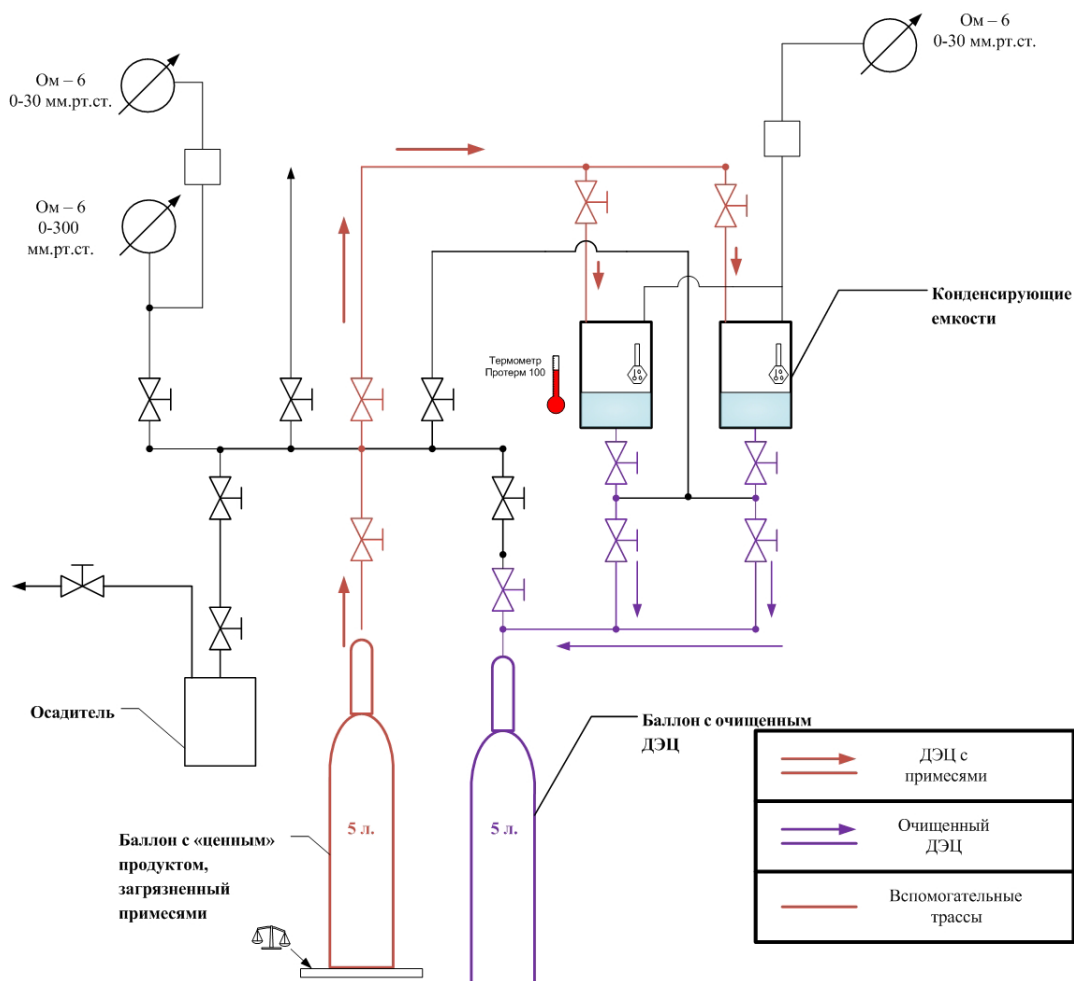


Рис. 2. Принципиальная схема установки очистки

Установка состоит из:

- двух конденсирующих емкостей;
- осадителя;
- коллектора, трубопроводов и вентиляей.

При изготовлении установки применялись алюминевые сплавы, нержавеющие стали и конструкционная сталь с антикоррозийным покрытием.

Пятилитровый баллон, поступивший на очистку после разделения в стенде, содержит 4,5÷4,8 кг рабочего вещества (ДЭЦ). При заданном технологическом режиме из баллона в емкость перемораживается ~ 99 % рабочего вещества (контроль осуществляется по весам).

Давление в баллоне с ДЭЦ составляет  $P \leq 15 \dots 20$  мм рт. ст. (давление насыщенных паров ДЭЦ при рабочей температуре). По трассе переморозки, на рис. 2 показана красным цветом, ДЭЦ поступает в емкость. Для технологического процесса очистки ДЭЦ необходимо поддерживать температуру в емкости от  $-40$  до  $-50$  °С. Температура в емкости поддерживается в заданном интервале регулированием уровня жидкого азота во внутреннем стакане емкости, контроль осуществляется по датчикам уровня жидкого азота. Температура в емкости контролируется по термометру ПРОТЕРМ 100. Время переморозки определяется потоком питания и весовым контролем остатка ДЭЦ в баллоне. В случае если переморозка идет быстрее и давление переморозки падает ниже уровня 10 мм рт. ст., поток газа поддерживается обдувом баллона теплым воздухом температурой 40 °С.

После переморозки ДЭЦ из баллона в емкость трасса переморозки и баллон перекрываются, емкость при этом продолжает морозиться, поддерживая заданную температуру. Давление конденсации в емкости контролируется непрерывно. По достижении давления  $P = 1 \div 2$  мм рт. ст., что соответствует давлению насыщенных паров тетраметилолова и тетраэтилолова, осуществляется прокачка емкости через осадитель. Прокачка через осадитель исключает попадание смеси газов в насос и атмосферу. После прокачки начинается размораживание емкости.

Перелив очищенного ДЭЦ из емкости (на рис. 2 трасса перелива показана фиолетовым цветом) производится только после ее полной разморозки, т. е. когда давление в емкости будет соответствовать давлению насыщенных паров ДЭЦ при температуре в помещении ( $P_{н.п.} = 15 \dots 20$  мм рт. ст.). Давление в емкости контролируется непрерывно.

Результаты работы установки представлены в табл. 2.

Среднегодовые показатели загрязненности ДЭЦ оловом

Год	Содержание олова в ДЭЦ после переработки на стенде, в среднем за год, ppm	Содержание олова в ДЭЦ после очистки, в среднем за год, ppm
2005	120	10
2006	90	5
2007	50	5
2008	15	5
2009	5	5

В ходе эксплуатации стендов наблюдается уменьшение содержания олова в «ценной» фракции, что возможно объясняется «вымыванием» олова из стенда.

С учетом возросшего интереса к цинку обедненного по изотопу  $^{64}\text{Zn}$  со стороны отечественных проектировщиков реакторов типа ВВЭР и РБМК, работа не потеряла своей актуальности.

### Литература

1. Рохов Ю., Херд Д., Льюис Р. Химия металлоорганических соединений. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963.
2. <http://www.urencо.com/content/167/Depleted-Zinc-Oxide-pellets.aspx>
3. <http://www.tracesciences.com/depletedzincacetatespecs.html>
4. <http://www.tracesciences.com/depletedzincisotopes.html>
5. Гауптман З., Грефе Ю., Ремане Х. Органическая химия. М.: «Химия», 1979.
6. Крель Э. Руководство по лабораторной перегонке. М.: «Химия» 1980.
7. Скорынин Г. М., Кононов Д. Б., Морозов О. А., Тимофеев Д. В. Снижение микроконцентрации олова в порошке оксида цинка, обедненного по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ . // Сборник докладов XII международной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 2008. С. 396–399.
8. Гельперин Н. И. Дистилляция и ректификация. М. – Л., 1947.



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА МОДЕЛИ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ АТОМНОЙ СТАНЦИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕАКТОРОМ

И. В. Друмов, С. В. Елин

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

## Введение

В настоящее время во всем мире ведутся работы по поиску альтернативных видов топлива, которые со временем придут на смену нефти и газу [1]. Одной из наиболее перспективных альтернатив может стать водородное топливо, дающее в качестве выхлопа обычный водяной пар. Водород по своей «калорийности» почти в 4 раза превосходит бензин. Производство водорода в промышленных масштабах может осуществляться с использованием тепловой энергии ядерных высокотемпературных реакторов. Современные проекты таких реакторов обещают понизить себестоимость водородного топлива до уровня цены бензина, а может быть и ниже.

В ОКБМ работы по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) ведутся с 1974 г. ВТГР является принципиально новым экологически чистым универсальным атомным энергоисточником. Его уникальные свойства – способность вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 1000 °С и высокий уровень безопасности – определяют широкие возможности по использованию этого типа реактора для снабжения теплом технологических

производств в различных энергоемких отраслях промышленности, для производства электроэнергии с высоким КПД и для экономичного производства водородного топлива.

На рис. 1 представлена общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения [2, 3, 4]. В реакторе происходит управляемая ядерная реакция, сопровождаемая нагревом теплоносителя. Управление этой реакцией, а также управление другими процессами на АЭС осуществляется автоматизированной системой управления технологическими процессами. Нагретый теплоноситель из реактора поступает в блок преобразования энергии, где он производит работу, связанную с вращением ротора турбомашины. Теплоноситель при этом охлаждается и возвращается в реактор. Генератор, являющийся частью турбомашины, преобразует энергию вращения в электрическую энергию. Поскольку частота вращения ротора турбомашины и требования к частоте напряжения, выдаваемого в электрическую сеть, в общем случае могут отличаться, то в составе оборудования предусматривается мощный преобразователь частоты.

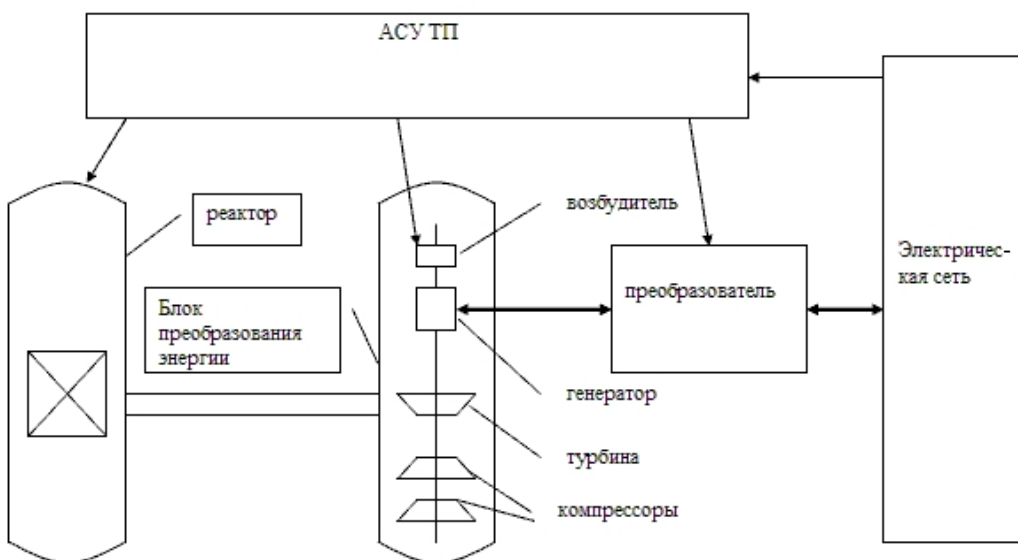


Рис. 1. Общая схема ядерной энергетической установки

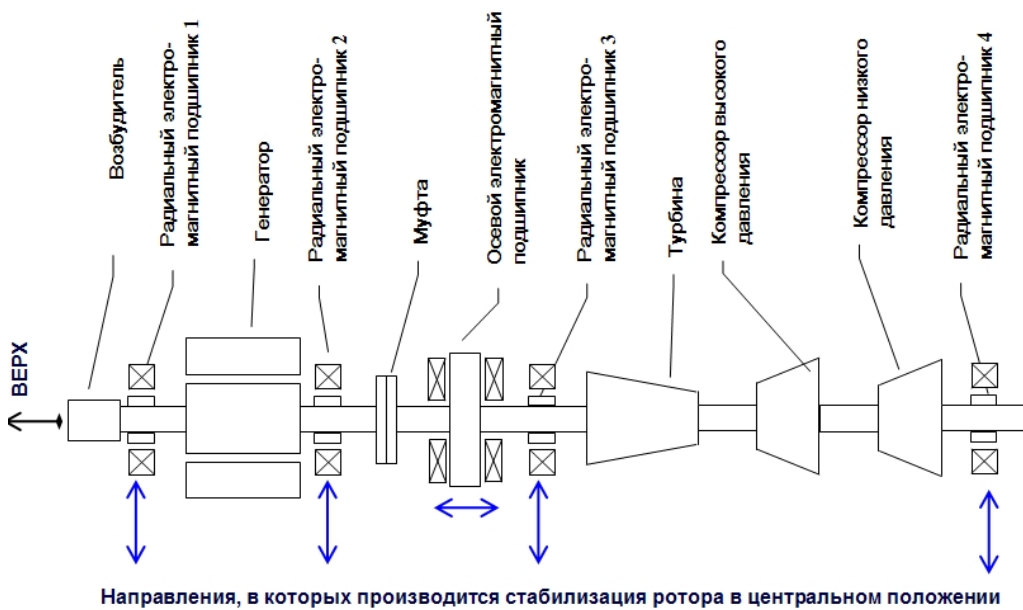


Рис. 2. Схема турбомашины

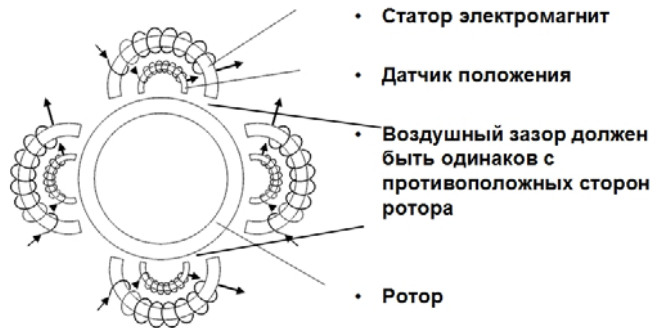


Рис. 3. Схемы РЭМП

### Использование электромагнитного подвеса ротора турбомашины АС с ВТГР

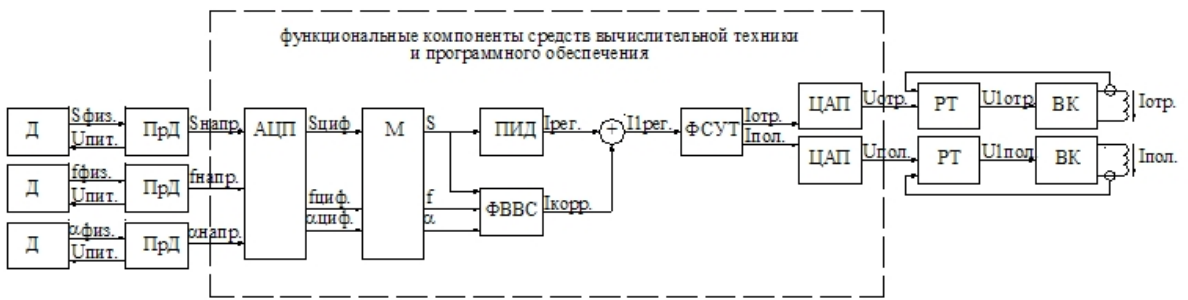
Одной из отличительных черт данного типа ЯЭУ является герметичность основного контура циркуляции гелия, проходящего через реактор и блок преобразования энергии, что исключает возможность использования масляных систем в контуре, в том числе масляных подшипников для турбомашин. Поэтому в составе блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором проектом предусмотрено использование турбомашин с ротором на электромагнитных подшипниках [5]. На рис. 2 представлено схематичное изображение турбомашин, показаны основные составные части турбомашин – турбокомпрессор, генератор, турбина, муфта, а также радиальные и осевые электромагнитные подшипники. Активные подшипники могут выпускаться в виде радиальных с цилиндрическим зазором, упорных с плоским зазором и радиально-упорных подшипников с коническим зазором. Полный электромагнитный подвес

ротора состоит, как правило, из двух радиальных и одного упорного подшипников. Стрелками обозначены направления, в которых активные электромагнитные подшипники стабилизируют роторы генератора и турбокомпрессора.

### Система электромагнитного подвеса ротора

На рис. 3 представлена принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника. Четыре электромагнита и четыре датчика положения расположены равномерно по окружности диаметрально противоположно. Роторная часть подшипника или ротор, выполненный из ферромагнитного материала «плавает» в магнитном поле, созданном четырьмя электромагнитами. Под воздействием электромагнитных сил ротор находится в состоянии равновесия. Положение ротора в рабочем зазоре опоры определяется с помощью датчиков, которые непрерывно фиксируют все возможные перемещения.

Управление работой системы электромагнитных подшипников производится системой управления [6, 7].



Д – датчик, ПрД – преобразователь датчика, АЦП – аналого – цифровой преобразователь, М – блок масштабирования, ПИД – ПИД – регулятор положения ротора, ФВВС – блок формирования вектора виртуальных сил, ФСУТ – блок формирования сигналов управления током, ЦАП – цифро – аналоговый преобразователь, РТ – регулятор тока, ВК – выходной каскад, S физ., Sнапр., Sциф., S – смещение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно, f физ., fнапр., fциф., f – частота вращения ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированная соответственно, α физ., αнапр., αциф., α – угловое положение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно, Iрег. – ток регулятора, Iкорр. – ток коррекции, I1рег. – ток регулятора с учетом тока коррекции, Iотр. и Iпол. – заданные токи обмоток, расположенных в направлении отрицательных и положительных значений смещения соответственно, Uпит. – напряжение питания, Uотр. и Uпол. – напряжения, задающие регулятору тока требуемую величину тока «отрицательной» и «положительной» обмоток, U1отр. и U1пол. – напряжения, управляющие выходным каскадом «отрицательной» и «положительной» обмоток

Рис. 4. Функциональная схема управления положением ротора по одному каналу

На рис. 4 представлена функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу. Данная функциональная схема обеспечивает управление положением ротора в электромагнитном подшипнике (ЭМП) по одной координате и входит в состав одного канала управления. Количество таких каналов определяется количеством координат. Осевой ЭМП обеспечивает управление положением ротора по одной координате (Z), каждый из четырех радиальных ЭМП обеспечивает управление положением ротора по двум координатам (X и Y) относительно вертикальной оси радиального ЭМП (РЭМП). Учитывая рассматриваемую структуру многоопорной системы, количество каналов управления положением ротора в ЭМП составляет девять (без учета резервирования).

Пунктиром на схеме выделены блоки, функции которых реализуются при помощи средств вычислительной техники и программного обеспечения. Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций:

Аналого – цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в  $n$ -разрядное двоичное число.

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме  $n$ -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов «датчик – преобразователь датчика».

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор положения ротора, вычисляющий ток регулирования по формуле:

$$I_{\text{рег.}}(t) = K_p \cdot S(t) + K_d \cdot (S(t) - S(t-\Delta t)) / \Delta t + K_i \cdot S(t) \cdot \Delta t + \text{Int}(t),$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм;  $K_d$  – коэффициент дифференцирования регулятора, А·с/мм;  $K_i$  – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с);  $S(t)$  – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени  $t$ , мм;  $S(t-\Delta t)$  – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени  $t-\Delta t$ , мм;  $t$  – время, с;  $\Delta t$  – время цикла работы управляющего контроллера, с;  $\text{Int}(t)$  – интегральная составляющая, накопленная к моменту времени  $t$ , А.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции  $I_{\text{корр.}}$  по формуле:

$$I_{\text{корр.}} = I_{\text{амп.}} \cdot \sin(\alpha + \varphi),$$

где  $I_{\text{амп.}}$  – величина вектора виртуальных сил, А;  $\alpha$  – угловое положение ротора, °;  $\varphi$  – угловое направление вектора виртуальных сил по оси  $I$ , °.

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора  $f$ , когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора турбомшины (ТМ).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов ЭМП представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате.

Цифро-аналоговое преобразование представляет собой преобразование в  $n$ -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В).

## Постановка задачи экспериментальных исследований

Опорные системы электромагнитных подшипников уже более 20 лет эксплуатируются в различных типах машин. Однако, вертикальный ротор весом в несколько десятков тонн, вывешенный в электромагнитных подшипниках с зазором в десятые доли миллиметра относительно статора, и, имеющий четыре критические частоты, две из которых изгибные, делает конструкцию турбомашин уникальной. Для подтверждения работоспособности такой конструкции требуется не только расчетное обоснование, но и экспериментальное подтверждение.

Одними из важнейших направлений экспериментальных исследований являются:

- отработка методики физической балансировки ротора на электромагнитных подшипниках;
- определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса при вращении, в том числе на резонансных частотах, в условиях воздействия внешних сил;
- применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса.

Для проведения этих исследований в ОКБМ созданы несколько исследовательских стендов, которые позволяют подтвердить принципиальную возможность применения электромагнитного подвеса в установке подобной конструкции, получить реальные данные, позволяющие верифицировать методики расчетов и расчетные коды.

В настоящем докладе описаны некоторые результаты экспериментальных исследований.

## Отработка методов физической балансировки

На рис. 5 представлены формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе. Эти формы соответствуют четырем критическим частотам ротора, причем третья и четвертая соответствуют изгибным частотам. Задача балансировки ротора в ЭМП [8, 9] сводится к идентификации форм колебаний ротора, определению углового направления и величины остаточного дисбаланса по каждой форме и расчету величин грузов, компенсирующих таким образом дисбаланс. Балансировка ротора проведена на каждой критической частоте, определенной по результатам снятия амплитудно-частотной характеристики. При проведении балансировки ротора были вычислены корректирующие грузы для варианта балансировки ротора по четырем формам колебаний. После установки системы балансировочных грузов на ротор было зафиксировано заметное снижение амплитуды колебаний ротора в районе ЭМП в диапазоне частот вращения до 6000 об/мин. Таким образом, была частично верифицирована методика балансировки гибкого вертикального ротора в электромагнитном подвесе.

### Определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса

При проведении расчетных исследований динамики ротора для пропорционально-дифференциального (ПД) – регулятора рассчитывается область устойчивости в координатах настроечных коэффи-

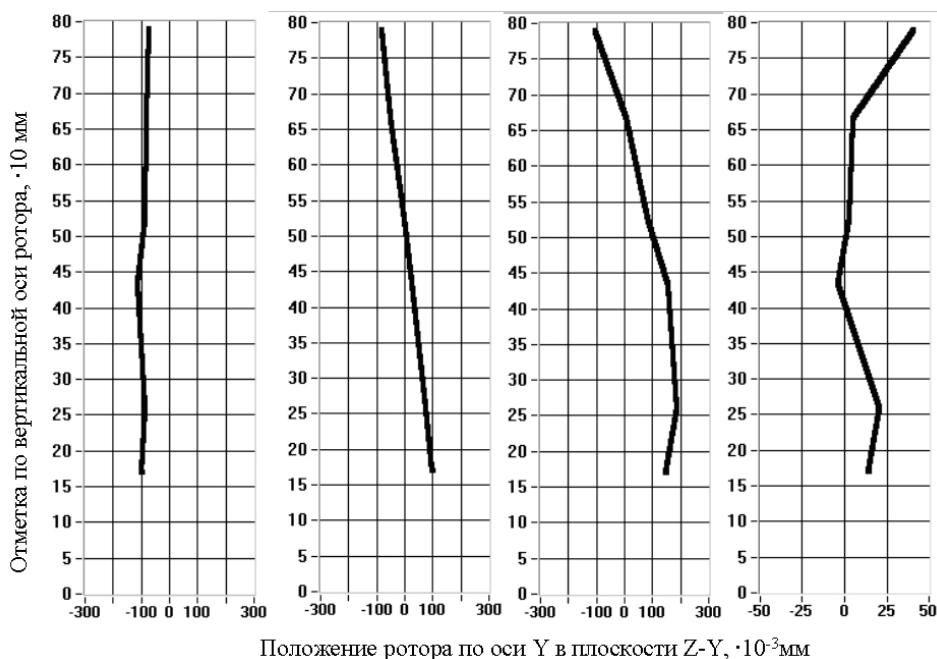


Рис. 5. Формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе

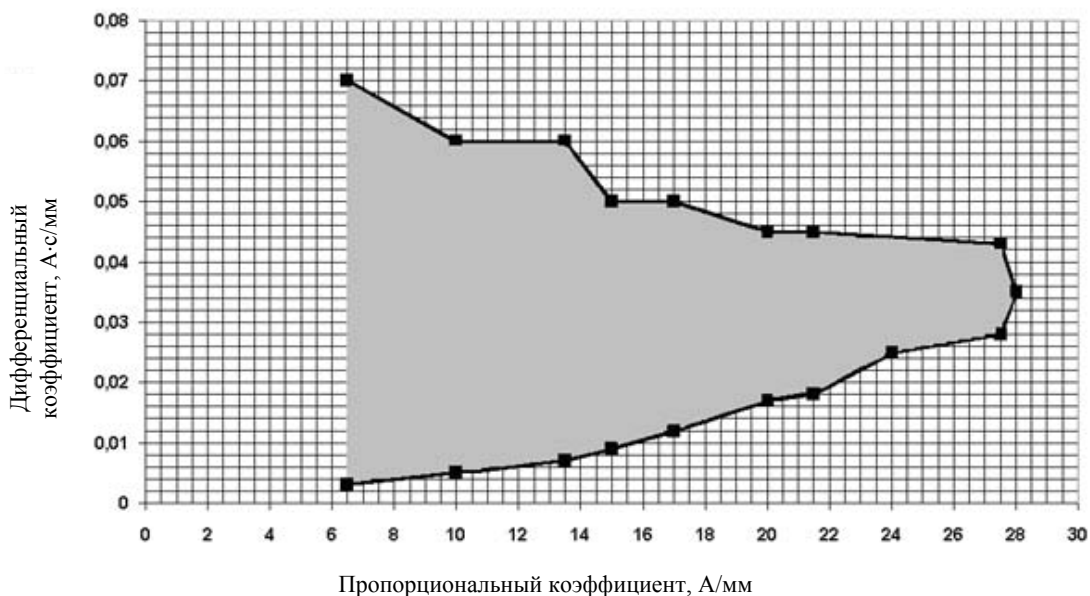


Рис. 6. Границы области устойчивости ПИД-регулятора РЭМП



Рис. 7. Амплитуды колебаний ротора при вращении:  
 — алгоритм включен; ..... — алгоритм выключен

циентов регулятора. В последствие указанная область подтверждается экспериментально снятой кривой, характеризующей ее границу. На рис. 6 показаны экспериментально определенные границы области устойчивости ПД – регулятора радиального электромагнитного подшипника. Если значения пропорционального и дифференциального коэффициентов выбраны из этой области, то ротор ведет себя устойчиво во всем диапазоне частот вращения.

По результатам исследований выбранного закона управления при различных частотах вращения ротора, а также других законов [10, 11] была обоснована работоспособность электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора.

### Применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса

Для обеспечения автоматического поддержания устойчивого вращения ротора при пуске и остановке при прохождении резонансных частот используется специальный закон управления, формирующий вектор «виртуальной» силы в электромагнитном подшипнике, что обеспечивает величину амплитуды колебаний ротора в заданной области относительно оси подшипников. На рис. 7 показана амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным законом и с выключенным. Как видно из графиков, включение закона позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний ротора на резонансной частоте 65 Гц.



## Применимость результатов исследований

Результаты проведенных испытаний учитываются при верификации программного обеспечения расчетов динамики ротора в электромагнитном подвесе, статических и динамических характеристик электромагнитных подшипников, в проекте блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором.

## Литература

1. <http://www.okbm.nnov.ru/russian/hydrogen>
2. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. М.: Высшая школа, 1978.
3. Arkal Shenoy. US History of Direct Cycle Gas-Turbine HTGRs. Presented at IAEA Technical Committee Meeting on Gas Turbine Power Conversion Systems Meeting/ November 15, 2000.
4. Пономарев-Степной Н. Н., Глушков Е. С., Гребенник В. Н., Кирюшин А. И., Кодочигов Н. Г., Кузавков Н. Г. Возможности использования модульного гелиевого реактора ГТ-МГР для диспозиции оружейного плутония. ISSN 0869-6772. Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia. 1999. № 3–4.
5. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Белов С. Е., Дельфонцев Н. С., Чистяков В. М. Электромагнитный подвес вертикальной турбомшины для атомной станции ГТ-МГР (англ.) // Материалы 5-й международной конференции по технологии электромагнитного подвеса, сентябрь 2001 г., Циттау, ФРГ.
6. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Боровиков А. Н., Друмов И. В. Система управления элект-

ромагнитным подвесом // Материалы 5-й международной конференции по технологии электромагнитного подвеса, сентябрь 2001 г., Циттау, ФРГ. С. 59–68.

7. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Победоносцев А. Б., Друмов И. В. Расчет и обоснование структуры и состава микропроцессорных контроллеров в цифровой системе управления многоопорной системой электромагнитного подвеса // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003 г., Кассель, ФРГ. С. 161–169.

8. Митенков Ф. М., Знышев В. В., Кирюшина Е. В., Николаев М. Я., Овчинников В. Ф., Фадеев А. В. Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 9–14.

9. Митенков Ф. М., Знышев В. В., Кирюшина Е. В., Кодочигов Н. Г., Николаев М. Я., Овчинников В. Ф. Влияние дисбаланса на нелинейную динамику вертикального ротора на электромагнитных подшипниках // Вестник ННГУ. Механика, № 4, 2009. С. 110–114.

10. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Белов С. Е., Востоков В. С., Друмов И. В., Ходыкин А. В. Исследование методов стабилизации ротора с полным электромагнитным подвесом // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003 г., Кассель, ФРГ. С. 153–160.

11. Mitenkov F. M., Kodochigov N. G., Drumov V. V., Belov S. E., Vostokov V. S., Drumov I. V., Klochkov O. B., Khodykin A. V. Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant. Proceedings of conference «PHYSCON2003» Saint-Peterburg, Russia. 2003. С. 146–151.

# ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОБРАЗОВАНИИ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВОК НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*П. Ю. Евграшин, М. А. Белов*

УлГТУ, г. Ульяновск

Доклад посвящен рассмотрению процесса образования погрешности установки на операциях механической обработки. Приведены выводы анализа предыдущих работ на эту тему. На примерах наиболее часто встречающихся схем установки рассмотрены предлагаемые подходы к оценке ее погрешности. В формулах отражены составляющие погрешности установки, особый акцент в докладе сделан на образовании погрешности базирования.

Несмотря на преобладание деталей и машин обычной точности, для современного машиностроения характерен постоянный рост доли высокоточных (прецизионных) деталей, а также постоянный рост требований к точности. В связи с этим требуются более адекватные реальным телам модели, которые позволят сократить погрешности обработки и увеличить точность производимых изделий, а также методики, которые могут применяться при проектировании технологических процессов. Все это, конечно, экономически целесообразно использовать именно для деталей высокой точности.

Вообще, чем выше точность детали, тем более точной должна быть модель, используемая при проектировании технологического процесса ее изготовления.

Установка заготовки на операции механической обработки – это придание ей требуемого положения относительно системы координат технологической системы с помощью приспособления и последующее ее закрепление.

Погрешность установки  $\omega_y$  составляет существенную часть общей производственной погрешности выдерживаемого размера (до 60 % погрешности обработки заготовок на металлорежущих станках в ряде случаев приходится на погрешность установки). Поэтому, понимание сущности механизма образования погрешности установки и разработка методики расчета этой погрешности представляет существенный интерес для теории и практики современной технологии машиностроения, когда доля высокоточных (прецизионных) деталей машин и приборов с микронными и долемикронными допусками на изготовление постоянно возрастает.

Вопросы установки деталей, как на операциях механической обработки, так и в сборочных единицах рассматривались многими российскими учены-

ми: Колесовым И. М., Косовым М. Г., Микитянским В. В., Махариским Ю. Е., а также Абрамовым Ф. Н., Сыроевым Ю. С. и многими другими. Тема является актуальной и перспективной. Достаточно глубоко она развивалась еще в 1960-е годы Колесовым И. М. и его учениками. Но недостатком того времени являлось отсутствие достаточных вычислительных мощностей, что привело к созданию формул и использованию методов расчета, имеющих некоторые условности, приводящие к неточностям при расчете. В настоящее время различными коллективами ведутся исследования по данному направлению, но целостной теории и методики еще не выработано.

Погрешность установки складывается из погрешности базирования, закрепления заготовки, погрешностей, обусловленных ее весом (особенно в случае обработки массивных заготовок), погрешности приспособления (а также ряда других):

$$\omega_y = \omega_б + \omega_з + \omega_в + \omega_{пр}, \quad (1)$$

где  $\omega_y$  – погрешность установки;  $\omega_б$  – погрешность базирования;  $\omega_з$  – погрешность закрепления;  $\omega_в$  – погрешность, связанная с весом заготовки;  $\omega_{пр}$  – погрешность приспособления.

Погрешность базирования  $\omega_б$  представляет собой сумму трех составляющих [1]:

$$\omega_б = +\omega_{б,ф} + \omega_{б,р} + \omega_{б,у}, \quad (2)$$

где  $\omega_{б,ф}$  – погрешность формы поверхностей заготовки;  $\omega_{б,р}$  – погрешность расположения поверхностей;  $\omega_{б,у}$  – погрешность, обусловленная схемой установки.

Основной в погрешности базирования является погрешность, связанная со схемой установки  $\omega_y$ , но на операциях высокоточной обработки важную роль будут играть как погрешность формы поверхностей, так и погрешность расположения поверхностей. Тем более, что  $\omega_y$  может, в силу своей природы, в отличие от них быть равной нулю, к чему и стремятся, особенно при высокоточной обработке.

Величина первой составляющей погрешности базирования  $\omega_{б,у}$  определяется выбором схемы установки заготовки на выполняемой технологической



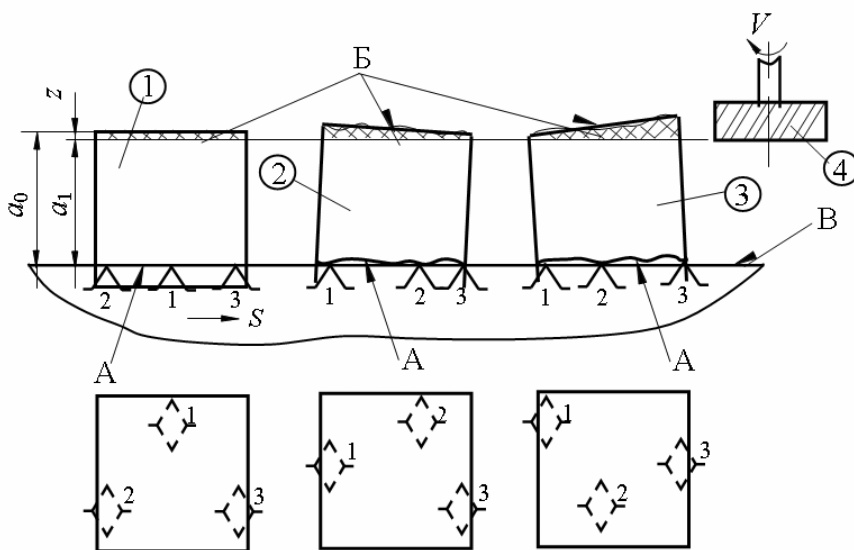


Рис. 1. Влияние макро рельефа базовой поверхности А заготовки на неравномерность снимаемого припуска  $z$ : ① – заготовка в виде идеального прямоугольного параллелепипеда; ②, ③ – заготовки с реальным макро рельефом установочной ТБ; ④ – фреза; Б – поверхность заготовки до начала обработки; В – установочная поверхность приспособления;  $a_0$  и  $a_1$  – размеры заготовки соответственно до начала и после обработки

операции (и соответствующим принятой схеме установки расположением технологических баз). Погрешность  $\omega_{б,y}$  не зависит от точности технологической системы, на которой выполняется данная операция. Погрешность  $\omega_{б,y}$  – это разность предельных положений исходной базы выдерживаемого линейного размера относительно режущих кромок настроенного на размер инструмента. Эта погрешность является следствием погрешностей, возникающих на операциях технологического процесса, предшествующих рассматриваемой.

При выборе схемы установки или схемы базирования необходимо стремиться базировать заготовку таким образом, чтобы погрешности  $\omega_{б,y}$  по выдерживаемым размерам были равны нулю. Погрешность  $\omega_{б,y}$  по выдерживаемому линейному размеру равна нулю в том случае, когда исходная база этого размера совмещена с технологической базой, лишаящей заготовку степени свободы в направлении выдерживаемого размера.

Вторая составляющая погрешности базирования  $\omega_{б,ф}$  отражает влияние на точность базирования микро- и макрогеометрических погрешностей формы контактирующих при базировании поверхностей заготовки и приспособления. Погрешность  $\omega_{б,ф}$  по сравнению с другими составляющими  $\omega_{б}$  относительно невелика. Расчет  $\omega_{б,ф}$  можно выполнить по методике, предложенной И. М. Колесовым. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что даже при совмещении исходной базы выдерживаемого размера с координатной плоскостью (или осью) системы координат

погрешность  $\omega_{б,ф}$  может оказывать существенное влияние на величины фактических припусков и точность выдерживаемых размеров. Особенно ярко это влияние проявляется в процессах высокоточной обработки заготовок. Влияние погрешности  $\omega_{б,ф}$  показан на рис. 1.

Величина третьей составляющей погрешности базирования  $\omega_{б,p}$  зависит от точности взаимного расположения базовых поверхностей заготовки. Погрешность  $\omega_{б,p}$  может составлять значительную часть погрешности базирования по выдерживаемым размерам. Например, в некоторых случаях  $\omega_{б,p}$  может быть сопоставима с допусками на выдерживаемые линейные размеры.

Погрешность  $\omega_{б,p}$  следует учитывать при расчете  $\omega_{б}$  по выдерживаемым линейным и угловым размерам. Например, при сверлении отверстия в заготовке корпусной детали (рис. 2.2) на точность размеров  $b$  и  $d$  влияют погрешности  $\omega_{б,p}$ , обусловленные погрешностями углового расположения технологических баз А, Б и В. Вследствие рассеивания значений угла  $\alpha$  в партии заготовок возникает погрешность по размеру  $b$ , связанная с разностью предельных положений ИБ этого размера:

$$\omega_{б,p}^b = 2 \cdot c \cdot \text{tg}(T_\alpha / 2),$$

где  $T_\alpha$  – допуск на угол  $\alpha$  заготовки (в град.);  $c$  – расстояние от верхней плоскости заготовки до опорных точек 4, 5 (установочных элементов приспособления).

Вследствие колебаний углов  $\beta$  и  $\gamma$  заготовки возникают погрешности  $\omega_{б,p}$  по размеру  $d$ , которые

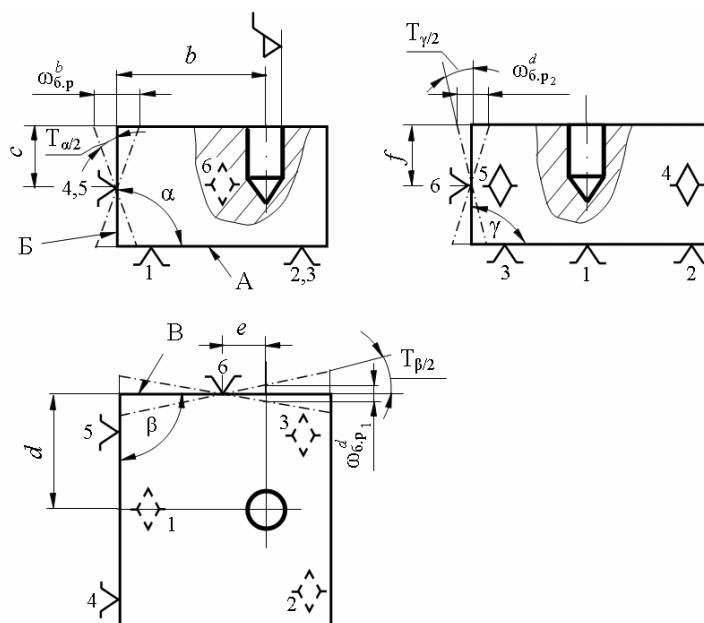


Рис. 2. Схема к определению погрешности  $\omega_{б,р}$  по выдерживаемым линейным размерам  $b$  и  $d$  при обработке отверстия в заготовке на вертикально-сверлильной операции: А, Б, В – соответственно установочная, направляющая и опорная базы

в двух взаимно перпендикулярных плоскостях равны соответственно:

$$\omega_{б,р1}^d = 2 \cdot e \cdot \operatorname{tg}(T_{\beta}/2);$$

$$\omega_{б,р2}^d = 2 \cdot f \cdot \operatorname{tg}(T_{\gamma}/2),$$

где  $T_{\beta}$  и  $T_{\gamma}$  – допуски на углы  $\beta$  и  $\gamma$  заготовки (в град.);  $e, f$  – размеры (рис. 2).

Погрешность  $\omega_{б,р}^d$  по размеру  $d$ , обусловленная погрешностью взаимного расположения базовых поверхностей заготовки, равна векторной сумме погрешностей  $\omega_{б,р1}^d$  и  $\omega_{б,р2}^d$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\bar{\omega}_{б,р}^d = \bar{\omega}_{б,р1}^d + \bar{\omega}_{б,р2}^d.$$

Заменяв векторную сумму квадратической, получим:

$$\omega_{б,р}^d = \sqrt{\left(\omega_{б,р1}^d\right)^2 + \left(\omega_{б,р2}^d\right)^2}.$$

Погрешность  $\omega_{б,р}$  может составлять значительную часть погрешности базирования по выдерживаемым размерам. Ниже (в третьей главе) показано, например, что в некоторых случаях  $\omega_{б,р}$  может быть сопоставима с допусками на выдерживаемые линейные размеры. Там же дана методика расчета указанной погрешности и приведены примеры ее расчета для схемы базирования призматической заготовки в координатный угол.

Вместе с тем следует отметить, что вопрос о влиянии погрешности  $\omega_{б,р}$  на погрешность базирования изучен еще недостаточно и по-прежнему требует

внимания, особенно в связи с развитием прецизионных технологий механической обработки.

Контактные деформации в стыках между базами заготовки и установочными элементами приспособления зависят от действия сил закрепления, веса заготовки, свойств материалов приспособления и заготовки, свойств материала поверхностного слоя его и микрорельефа, а также конструкции элементов приспособления. Сумму погрешностей закрепления и веса можно представить как погрешность от контактных деформаций:

$$\omega_{кд} = \omega_{з} + \omega_{в}, \quad (3)$$

где  $\omega_{кд}$  – погрешность от контактных деформаций.

Погрешность связанная с приспособлением  $\omega_{пр}$  возникает в результате неточности изготовления приспособления  $\omega_{п}$ , его установки и фиксации на станке  $\omega_{ус}$  и износа установочных элементов  $\omega_{изн}$  [2]:

$$\omega_{пр} = \omega_{п} + \omega_{ус} + \omega_{изн}, \quad (4)$$

где  $\omega_{п}$  – погрешность деталей приспособления;  $\omega_{ус}$  – погрешность установки приспособления;  $\omega_{изн}$  – погрешность от износа контактных поверхностей приспособления.

Погрешность  $\omega_{п}$  в основном зависит от точности изготовления деталей приспособления. Погрешность  $\omega_{ус}$  возникает в результате смещений и перекоса корпуса приспособления на столе, планшайбе или шпинделе станка. Составляющая  $\omega_{и}$  характеризует изменение положения контактных поверхностей установочных элементов в результате их изнашивания.

Кроме перечисленных погрешностей, которые авторам представляются наиболее значимыми, существует еще большое количество погрешностей, которые в каждом конкретном случае проявляют себя в большей или меньшей степени. Решение об их учете ложится на плечи технолога и зависит от его опыта. Одной из перспективных задач является автоматизация как вычисления данных погрешностей, так и выбор погрешностей, которые должны учитываться в расчете.

1. Худобин Л. В., Белов М. А., Унянин А. Н. Базирование заготовок при механической обработке: учебное пособие / Под общ. ред. Л. В. Худобина. Ульяновск: УлГТУ, 2009.
2. Микитянский В. В. Точность приспособлений в машиностроении. М.: Машиностроение, 1984.

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

*М. А. Егорова, С. Д. Ефимов, А. Н. Панков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Магниторезистивный датчик угла (МРД) предназначен для измерения бесконтактным способом угла поворота вала электродвигателя. К достоинствам этого датчика положения следует отнести бесконтактность, способность работать в диапазоне температур  $-55$  до  $150$  °С, высокое быстродействие. В основе принципа его действия лежит анизотропный магниторезистивный эффект, который заключается в изменении сопротивления электрическому току вследствие изменения направления намагниченности внутренних доменов слоя пермаллоя под воздействием внешнего магнитного поля.

В настоящей работе представлено краткое описание устройства, принципа действия и конструкции МРД. Приведены результаты расчетов методом конечных элементов (МКЭ) вариантов электромагнитных систем, исследовано влияние геометрических параметров на магнитные поля, определены материал, форма и размер элементов.

В процессе разработки магнитной системы решались следующие задачи:

- проектирование и расчет магнитной системы с заданным распределением магнитного поля;
- выбор материалов;
- исследование влияния геометрии магнитной системы на характеристики распределения магнитного поля.

## Устройство и принцип работы

Основным элементом МРД является магниторезистивный чувствительный элемент (МРЧЭ) (рис. 1), который представляет собой сложную многослойную структуру, состоящую из магниторезистивного, проводящих, изоляционных и защитного слоев. В качестве материала магниторезистивного слоя используется пермаллой со структурой Co-Fe-Ni.

Сопротивление ферромагнитных пленок зависит от ориентации вектора намагниченности, которое определяется, в том числе, направлением внешнего магнитного поля относительно тока в материале [1]. Основу МРЧЭ составляет мост Уинстона. Каждое из четырех плеч моста состоит из магниторезистивных полосок, соединенных проводящими немагнитными перемычками в меандры.

При взаимодействии с внешним магнитным полем, в диагонали моста возникает разность потенциалов, зависящая от напряжения питания моста и величины поля.

Датчик состоит из двух магнитопроводов. На жестко связанном с входным валом магнитопроводе располагается кодовый магнитный диск, который определяет амплитуду и знак импульсов на выходе МРЧЭ, а также порядок их следования.

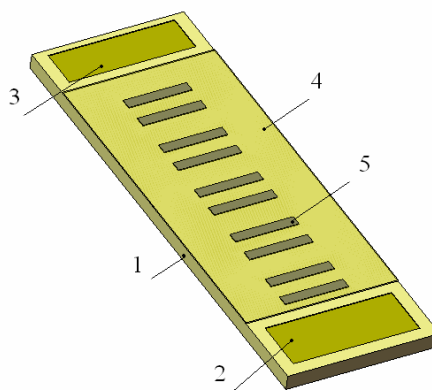


Рис. 1. Внешний вид МРЧЭ: 1 – подложка; 2, 3 – контактные площадки; 4 – защитный слой; 5 – магниторезистивный полумост

Выходная информация с разрабатываемого МРД содержит абсолютное значение углового положения, представленное немодифицированным кодом Грея [2]. Количество разрядов МРЧЭ определяет разрешающую способность (дискретность) МРД. Каждый разряд кодируется двумя дорожками, каждая из которых располагается над магниторезистивным полумостом (МРП). Таким образом, в зависимости от расположения магнитного элемента кодового диска над тем или иным МРП можно задать значение логической «1» или логического «0». Для исключения неопределенных состояний на внешней стороне кодовой шкалы диска расположен дополнительный ряд, разрешающий считывание значащих разрядов. Величина магнитного поля в центре рабочего МРП, должна составлять не менее 30 мТл, а в центре нерабочего – не более 10 мТл.

Например, если максимальный наружный диаметр кодового диска равен  $\varnothing 46$  мм, внутренний –  $\varnothing 20$  мм, а дискретность датчика не менее  $22,5^\circ$ , то максимальный размер кодирующей ячейки будет составлять  $2,5 \times 3,5$  мм (рис. 2).

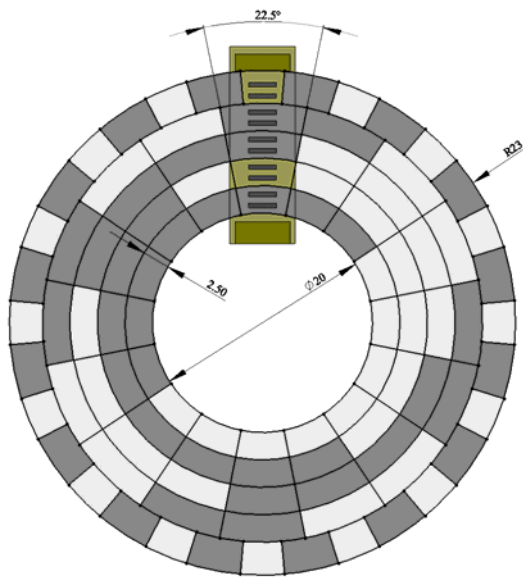


Рис. 2. Взаимное расположение МРЧЭ и кодовой шкалы

### Анализ вариантов конструкций магнитной системы МРД

Возможные варианты конструкции магнитной системы МРД приведены на рис. 3.

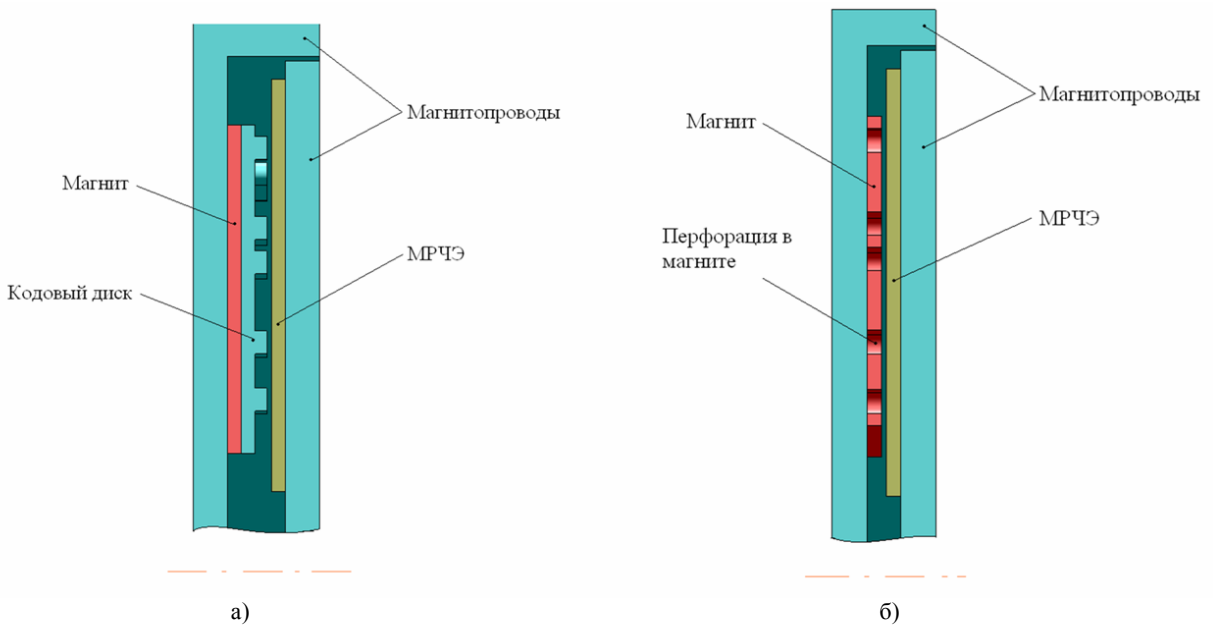


Рис. 3. Варианты конструкции магнитной системы МРД:  
а – модель конструкции № 1; б – модель конструкции № 2

Третий вариант конструкции, с кодовым диском, набранным из отдельных постоянных магнитов, является частным случаем модели № 2 и ввиду технологической сложности изготовления не рассматривается.

В упрощенных моделях конструкций был выполнен анализ МКЭ зависимости величины магнитной индукции в МРЧЭ от геометрических параметров магнитной системы в положении соответствующем кодовому набору 10100 (рис. 4). Магнитные

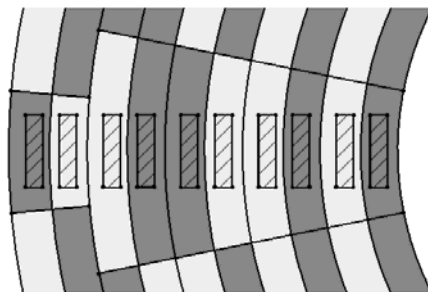
системы содержат постоянный магнит, имеющий остаточную индукцию  $B_r = 0,24$  Тл, коэрцитивную силу по индукции  $H_c = 135$  кА/м и магнитопроводы с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 2000$ .

В табл. 1 и 2 приведены расчетные значения магнитной индукции в центре смещенного ( $B_1 \geq 30$  мТл, находящегося в области с высокой магнитной индукцией, окрашено темным цветом на рис. 4) и несмещенного ( $B_2 \leq 10$  мТл) МРП.

Из табл. 1 видно, что  $B_2$  в модели конструкции № 1 превышает пороговое значение магнитного поля 10 мТл, а изменение геометрических параметров магнитной системы не оказывает существенного влияния на отношение  $K$ .

Модель конструкции № 2 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разрабатываемому датчику.

Из результатов расчетов следует, что для увеличения отношения  $K$  необходимо уменьшать толщину кодового магнитного диска и увеличивать ширину пазов перфорации.



- площадь, занимаемая чувствительной зоной МРЧЭ

Рис. 4. Фрагмент кодирующего диска

Таблица 1

Результаты расчетов для модели конструкции № 1

Название параметра	Величина, мм	$B_1$ , мТл	$B_2$ , мТл	$K = B_1/B_2$
Длина выступов на кодовом диске	0,3	53	41	1,3
	0,5*	55	38	1,4
	0,7	56	38	1,5
Толщина подложки МРЧЭ	0,3	74	45	1,6
	0,6*	55	38	1,4
	1	44	32	1,4
Ширина выступов на кодовом диске	0,4	52	37	1,4
	0,6	54	38	1,4
	1*	55	38	1,4
Толщина магнита	0,4	52	37	1,4
	0,5	54	38	1,4
	0,6*	55	38	1,4

\* – обозначает основные размеры, использованные при варьировании параметров

Таблица 2

Результаты расчетов для модели конструкции № 2

Название параметра	Величина, мм	$B_2$ , мТл	$B_1$ , мТл	$K B_1/B_2$
Толщина подложки МРЧЭ	0,3	8	57	7
	0,6*	4	47	12
	1	5	43	9
Толщина кодового магнитного диска	0,4	7	37	5
	0,5	5	43	9
	0,6*	4	47	12
Ширина пазов	0,4	25	51	2
	0,6	13	50	4
	1*	4	47	12

\* – обозначает основные размеры, использованные при варьировании параметров

На рис. 5 представлены изображения распределения магнитной индукции в МРЧЭ для вариантов модельной конструкции.

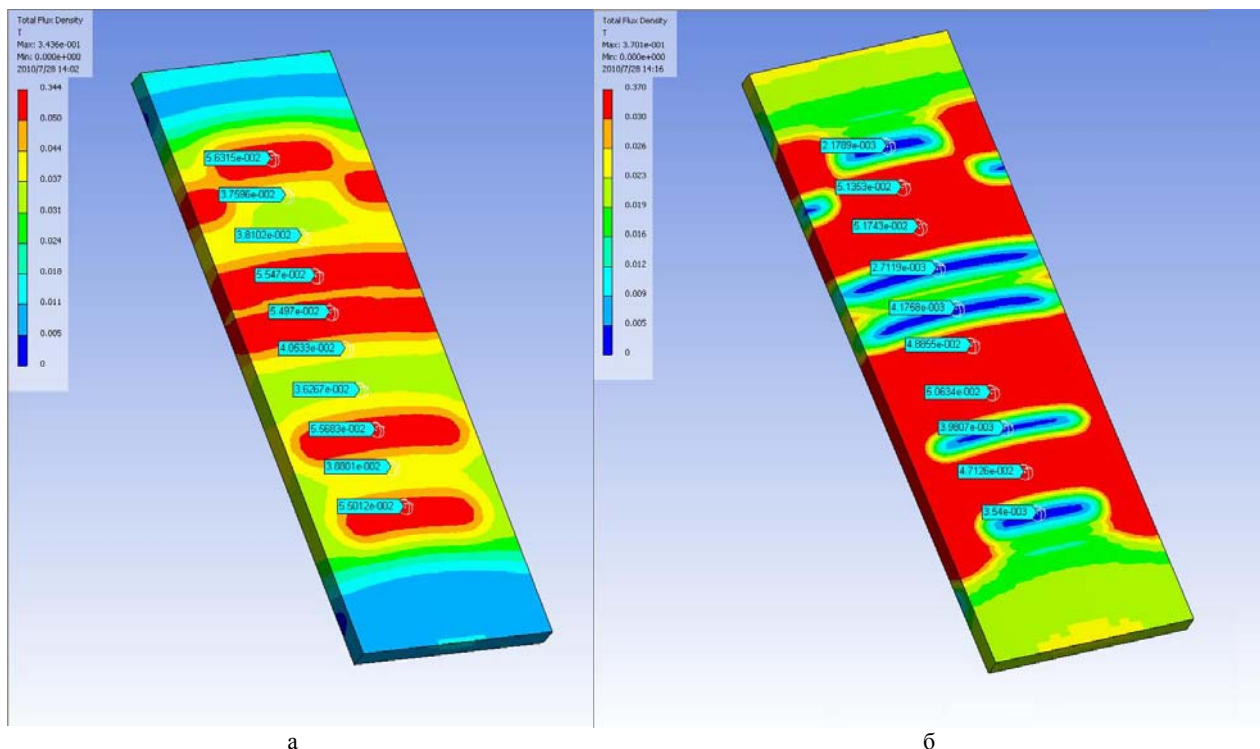


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в МРЧЭ: а – в модели № 1; б – в модели № 2

## Выбор материалов

В качестве материала постоянного магнита предлагается использовать ферромагнетик, например, феррит бария. Ферромагнетики изготавливаются из дешёвого сырья – окислов железа – по керамической технологии и технологии порошковой металлургии с прессованием (для анизотропных ферритов – в магнитном поле) и двукратным высокотемпературном спекании. Из механообработки допускается шлифовка и резка алмазным инструментом [3].

Феррит бария отличается высокой стабильностью магнитных свойств, слабой подверженностью размагничиванию, температура точки Кюри не менее 450 °С. Основными недостатками являются хрупкость и низкая технологичность [4]. Ввиду сложной формы магнита кодового диска его изготовление должно выполняться по заказу потребителя.

По своим магнитным свойствам для изготовления кодового диска допустимо использовать магнитопласты. Они технологичны, имеют высокую стабильность и однородность магнитных свойств [4]. Однако, допустимая рабочая температура не более 100 °С, что накладывает ограничение на их применение в магнитной системе МРД.

Для магнитопровода предлагается использовать магнитомягкий сплав температурный коэффициент

расширения (ТКР) которого наиболее близок к ТКР подложки МРЧЭ.

Таким образом, выбраны следующие материалы: материал магнитопроводов сплав 45Н (ТКР =  $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), подложки – ситалл СТЛ-1 (ТКР =  $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). В качестве материала магнитного кодового диска выбран бариевый магнитотвердый феррит 6БИ250 ( $H_c = 120 \text{ кА/м}$ ,  $\mu = 1,26$ ).

## Влияние величины зазоров

После определения конструкции, геометрии и используемых материалов магнитной системы МКЭ был выполнен подробный расчет МРД (рис. 6).

Как видно из изображения индукции магнитного поля в зоне МРЧЭ (рис. 7) предлагаемая конструкция обеспечивает формирование заданного распределения. В площадках, где расположены МРП, значения магнитной индукции удовлетворяют требуемым значениям.

Так как при изготовлении и сборке датчика неизбежно возникнут технологические погрешности взаимного расположения, МКЭ был выполнен расчет зависимости значений магнитной индукции в МРЧЭ от величины зазоров «а» и «б» (рис. 6). Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 8 (а, б).



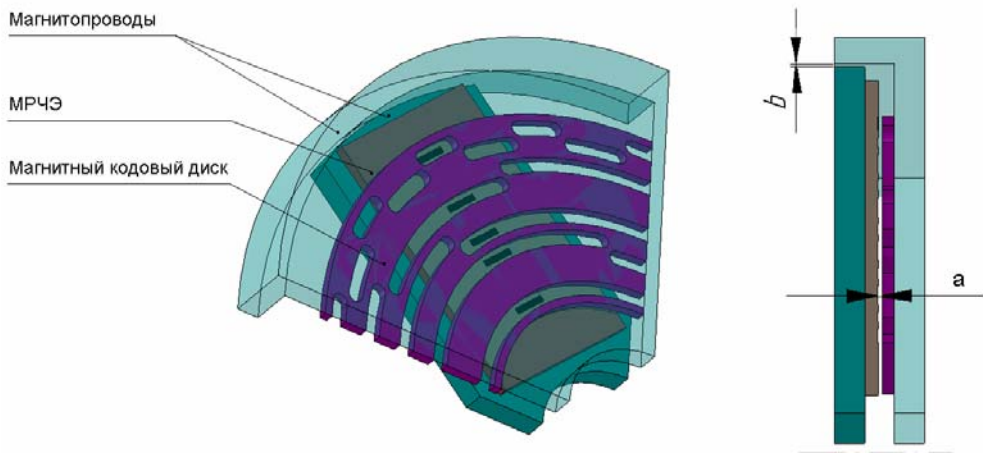


Рис. 6. Внешний вид МРД

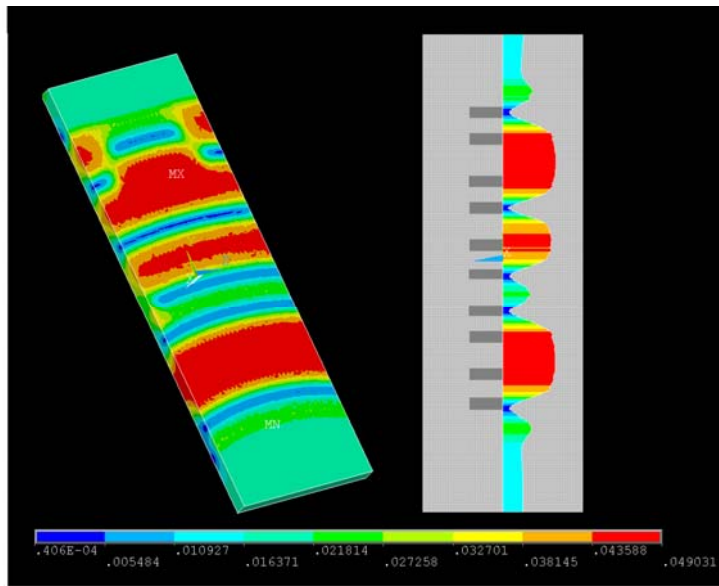


Рис. 7. Распределение магнитного поля в МРЧЭ

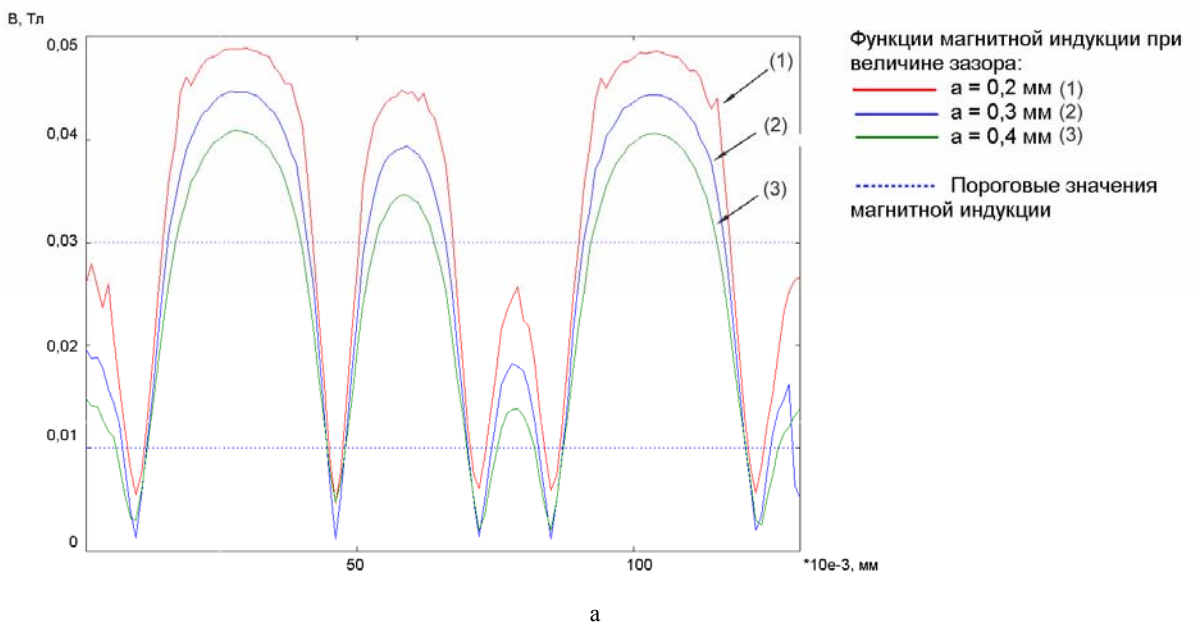


Рис. 8. Изменение функции магнитной индукции: а – от величины зазора «а»; б – от величины зазора «б» (см. также с. 442)

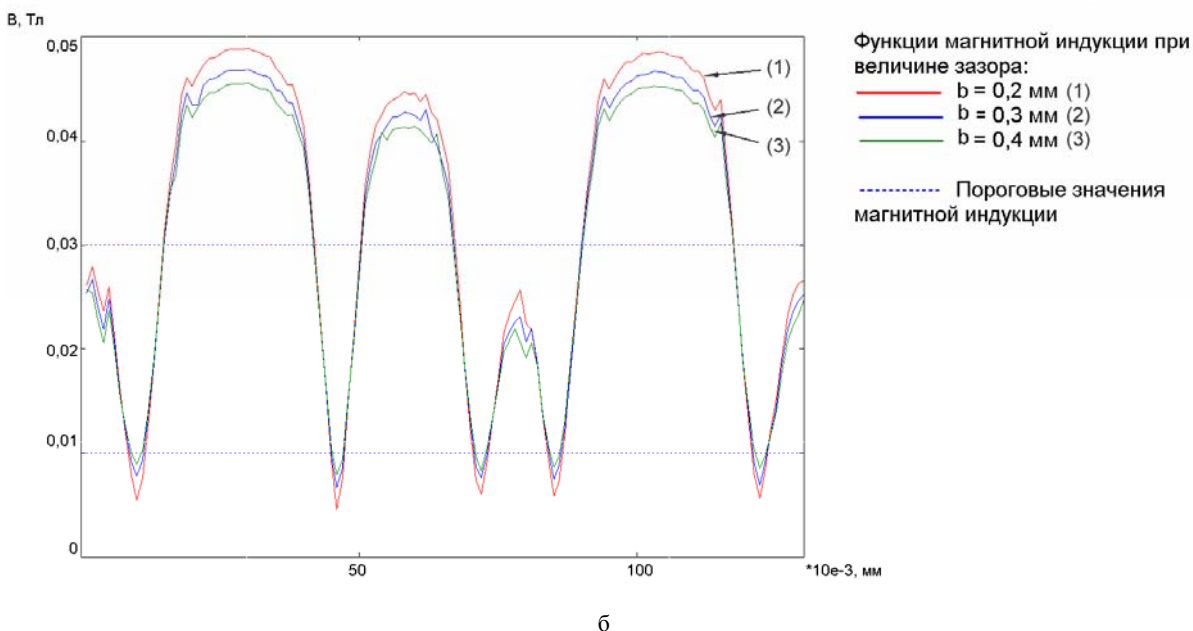


Рис. 8. Окончание

Из рис. 8 (а, б) следует, что оптимальная величина зазора между МРЧЭ и кодовым диском  $a = 0,3$  мм, а между магнитопроводами  $b = 0,2$  мм.

### Заключение

Описана конструкция датчика абсолютного углового положения, реализуемого на основе МРЧЭ и кодового диска с немодифицированным кодом Грея. В статье рассмотрена реализация четырехразрядного датчика. Приведены варианты построения и результаты моделирования магнитной системы МРД. Обоснована оптимальная конструкция магнитной системы, проведена оценка влияния геометрии на распределение магнитного поля в МРЧЭ, определены размеры и выбраны материалы. Представленные

результаты могут быть использованы при конструировании магнитных систем электрических машин.

### Литература

1. Касаткин С., Муравьев А. Тонкопленочные магниторезистивные датчики // Электронные компоненты. 2003. № 3. С. 93–96.
2. Принцип работы абсолютного энкодера. JSC «Multichip». [http://www.radioradar.net/articles/scientific\\_technical](http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical)
3. Хрульков В. А. Механическая обработка изделий из магнитных материалов в приборостроении. М.: Машиностроение, 1966.
4. Пятин Ю. М. Постоянные магниты. М.: Энергия, 1971.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

*М. Н. Ереев, А. С. Марков, В. А. Панов*

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Основными факторами, влияющими на ресурсные отказы конструктивных элементов энергетического оборудования реакторной установки (РУ) в процессе эксплуатации, являются процессы теплообмена при изменении режимов нагружения и процессы накопления повреждений в результате многоциклового и малоциклового усталости. Дegrадация материала в процессе накопления повреждений при длительном термосиловом нагружении оборудования проявляется в снижении пластических свойств и прочностных характеристик материала, что в конечном итоге приводит к образованию макроскопической трещины (длиной ~ 1–2 мм).

Математическое моделирование процессов накопления усталостных повреждений позволяет проводить анализ и прогнозирование развития поврежденности в любых доступных и недоступных для средств неразрушающего контроля зонах конструктивных элементов по фактической истории их термомеханического нагружения.

Математическая модель расчета поврежденности конструкционных материалов, основана на совместном интегрировании эволюционных уравнений неизоотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений [1]. Данная математическая модель позволяет учитывать:

- монотонное и циклическое упрочнение конструкционного материала при неизоотермическом пропорциональном и непропорциональном нагружении (вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций);

- пластическую анизотропию (изменение модулей упрочнения) при изменении направления деформирования;

- прогрессирующее изменение прочностных характеристик конструкционных материалов в процессе накопления усталостных повреждений;

- влияние многоосности напряженного состояния и непропорциональности нагружения (траектории деформирования) на темпы накопления повреждений;

- нелинейность процесса накопления повреждений;

- нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения.

Алгоритм совместного интегрирования эволюционных уравнений упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений

реализован в коде программного средства «Ресурс-НН» [2], которое позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций и температуры рассчитывать параметры процессов неизоотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в данном объеме материала.

Математическое моделирование позволяет проводить анализ развития поврежденности в любой зоне конструктивного узла в зависимости от исходного состояния материала и конкретных параметров нагружения этой зоны. Точность прогноза зависит от адекватности применяемых моделей реальному процессу деградации материала и соответствия моделируемого режима нагружения в данной зоне фактическим условиям эксплуатации РУ, но требуется периодическая коррекция теоретических оценок ресурса материала в контролируемых зонах с помощью средств неразрушающего контроля при ремонтах или продлении назначенных сроков службы.

В статье [3] представлены результаты расчетного анализа процессов накопления усталостных повреждений в рабочей части стандартных цилиндрических образцов, изготовленных из стали 08X18H10T и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными и с расчетом по «Нормам...» [4].

На рис. 1 представлены кривые накопления усталостных повреждений по «Нормам...» [4] (пунктирная кривая) и согласно методики [2] при регулярном циклическом нагружении цилиндрических образцов: кривая 1 – с амплитудой  $\Delta\epsilon_{11} = 0,002$ , кривая 2 – с амплитудой  $\Delta\epsilon_{11} = 0,003$ , кривая 3 – с амплитудой  $\Delta\epsilon_{11} = 0,004$ . По оси абсцисс отложено отношение  $N_i/N_{fi}$ , по оси ординат поврежденность  $\omega$ .

На рис. 2 приведены результаты расчета усталостной долговечности при трехблочном нагружении с уменьшением амплитуд деформации:  $0,004 \Rightarrow \Rightarrow 0,003 \Rightarrow 0,002$ .

Пунктирная кривая – расчет по «Нормам...» [4]. Сплошные линии – расчет по методике. Точка А соответствует расчетной поврежденности материала в конце первого блока, точка В – поврежденности в конце второго блока, точка С – поврежденности в конце третьего блока. Поврежденность материала по «Нормам...» [4] измеряется количеством некоторых

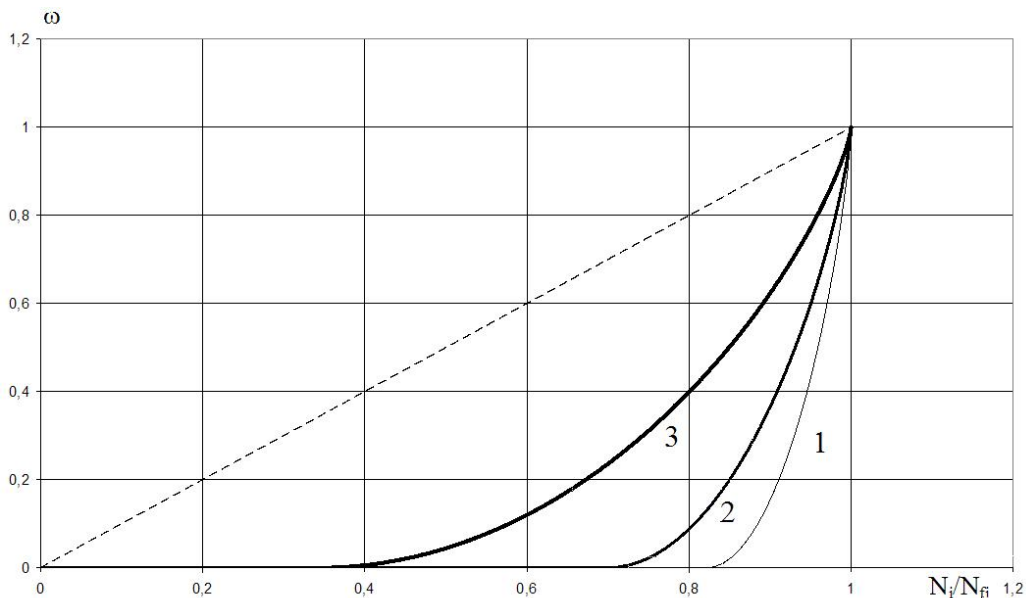


Рис. 1.

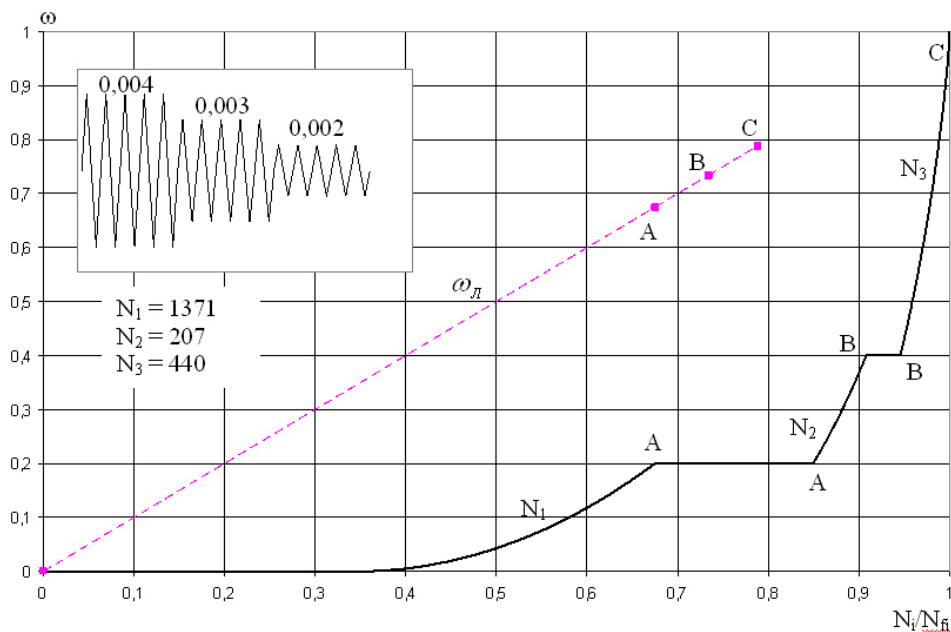


Рис. 2.

приведенных регулярных циклов  $\omega_d = \sum \frac{N_i}{N_{fi}}$ , где

$N_i$  – количество циклов с некоторой  $i$ -ой постоянной амплитудой интенсивности по Мизесу условно-упругих напряжений,  $N_{fi}$  – количество предельных циклов при данной амплитуде. Предельное значение  $\omega_d = 1$ .

На рис. 3 приведены аналогичные результаты при трех блочном нагружении с увеличивающейся амплитудой деформаций  $0,002 \Rightarrow 0,003 \Rightarrow 0,004$ .

В табл. 1 приведены результаты расчета циклической прочности по энергетическому критерию [2] и по «Нормам...» [4] для данных видов нагружений,

с коэффициентами запаса по напряжениям  $n_\sigma = 1$  и по числу циклов  $n_N = 1$ .

Из анализа результатов видно:

1. Для первого варианта нагружения согласно нелинейного принципа суммирования повреждений

$\omega_f = \sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 0,78$ , что соответствует результатам

экспериментов при блочном нагружении с уменьшением амплитуды деформаций. При данной истории нагружения образца «Нормы...» [2] согласно критерию  $\sum \frac{N}{N_f} = 1$  дают неконсервативную погрешность

долговечности  $\sim 22\%$ .

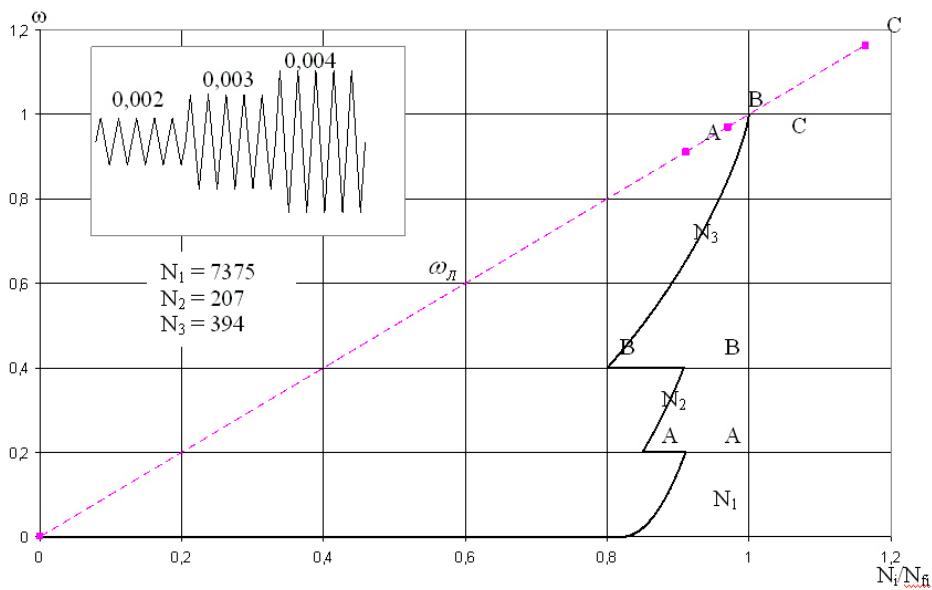


Рис. 3.

Таблица 1

Вариант нагружения	Расчетный подход	Количество циклов при амплитуде деформаций до образования трещины длиной 1мм		
		$\Delta e_{11} = 0,004$	$\Delta e_{11} = 0,003$	$\Delta e_{11} = 0,002$
1	Энергетический	1371	207	<b>440</b>
	Нормативный	1371	207	<b>2153</b>
2	Энергетический	<b>394</b>	207	7375
	Нормативный	<b>61</b>	207	7375

Таблица 2

Номер расчетного узла	Величина поврежденности расчетных узлов		
	по «Нормам...» [4] $n_{\sigma} = 2, n_N = 10$	по «Нормам...»[4] $n_{\sigma} = 1, n_N = 1$	«Ресурс-НН» ( $\omega$ )
2085	9,75	0,97	0
1675	12,2	1,21	0
1444	17,4	1,745	0
34	10,4	1,04	0
1385	0,06	0,001	0,18
1590	–	–	0,00025

2. Для второго варианта нагружения согласно линейном суммировании повреждений  $\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 1,16$ .

При данной истории нагружения образца согласно критерию  $\sum \frac{N}{N_f} = 1$  «Нормы...» дают консерватив-

ную погрешность долговечности ~ 16 %.

В ОАО «ОКБМ Африкантов» ведется работа по созданию моделей для верификационных испытаний лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) РУ. Для данной работы был проведен расчет фланцевого соединения при действии термосилового нагружения. На рис. 4 представлена расчетная конечно-элементная модель с номерами расчетных узлов в наиболее напряженных зонах конструкции. В зонах конструктивных неодн-

родностей и концентраторов конечно-элементная сетка имеет оптимальное, для обеспечения приемлемой точности вычисления, сгущение.

Было проведено два расчетных анализа данной конструкции в условно-упругой и упругопластической постановке с фактическими свойствами конструкционных материалов. На рис. 5–6 представлены изолинии распределения интенсивности напряжений в момент времени соответствующий максимальному напряжению конструкции.

В табл. 2 представлены результаты расчета величины поврежденности в расчетных узлах КЭС после нагружения определенным количеством термоциклов.

Из анализа результатов расчета по двум подходам можно сделать следующие выводы:

1. Согласно методике «Норм ...» [4] требуемый ресурс данного фланцевого соединения не обес-

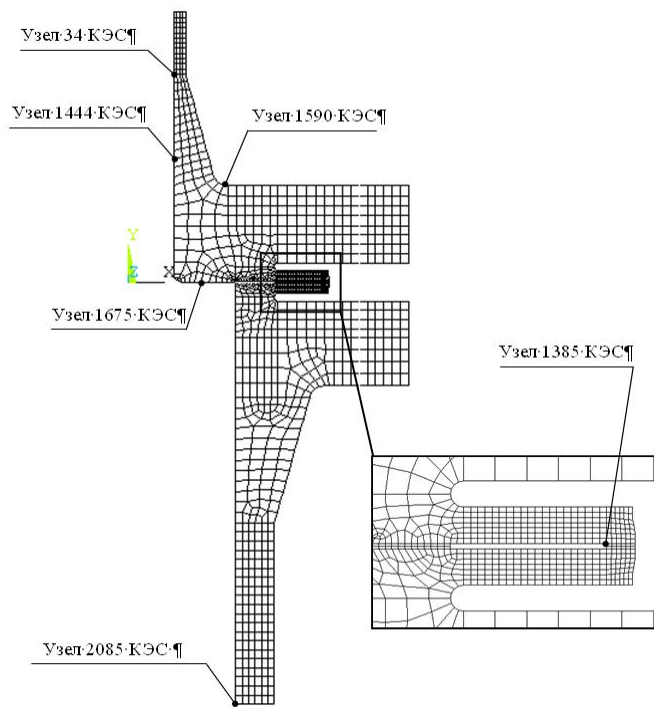


Рис. 4

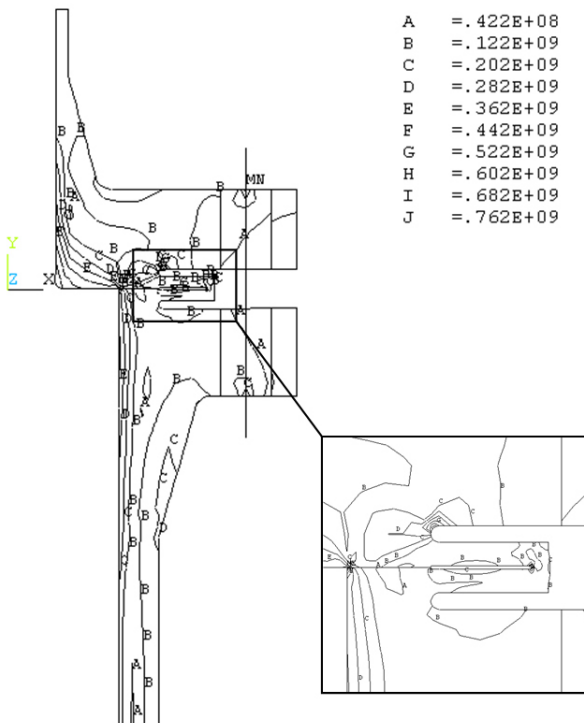


Рис. 5. Изолинии распределение интенсивности напряжений в условно-упругой задаче

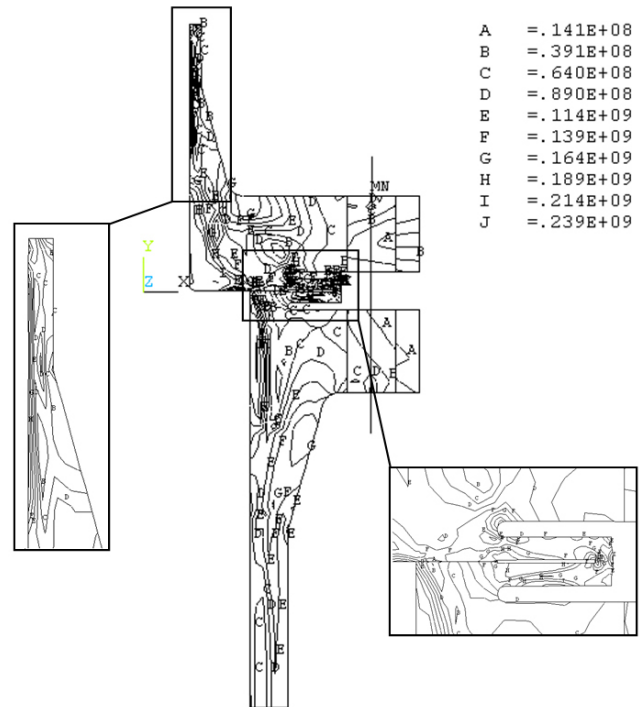


Рис. 6. Изолинии распределение интенсивности напряжений в упругопластической задаче

печивается даже без использования нормативных коэффициентов запаса циклической прочности по напряжениям и числу циклов. В данном случае оценку циклической прочности требуется проводить по результатам ресурсных испытаний.

2. На основании результатов упругопластического расчета показано, что наиболее нагруженной

зоной данного соединения является сварной шов (узел 1385 КЭС) и он будет определять ресурс конструкции в целом. Использование энергетического критерия накопления усталостных повреждений, реализованного в коде программного средства «Ресурс-НН» [2], показало, что ресурс данного фланцевого соединения превышает требуемый на ~ 30 %.

3. Окончательное сопоставление результатов расчета по данным подходам будет проведено после испытания лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) РУ.

### **Литература**

1. Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г., Панов В. А., Пичков С. Н. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ. М.: Машиностроение. 2008.

2. Программа Ресурс-НН. Расчет параметров неизотермического деформирования и накопления по-

вреждений в конструкционных материалах оборудования и систем ЯЭУ. Верификационный отчет. Инв. № 11579/10от по учету ОАО «ОКБМ Африкантов».

3. Доклад «Применение энергетического принципа для анализа термоусталостной долговечности конструкционных материалов ЯЭУ» // Сборник докладов седьмой научно-технической конференции «Молодежь в науке». 2009.

4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / ПНАЭ Г-7-002-86.



# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРИБОРОВ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

С. Г. Митясов, К. В. Есавкин

ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко», г. Заречный Пензенской обл.

В условиях острой конкуренции на рынках товаров и услуг на первый план выходят задачи по сокращению, той части жизненного цикла изделия, которая связана с изготовлением и испытанием опытного образца. Для решения этих задач на ФГУП ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М. В. Проценко» применяются различные CAD/CAM/CAE программное обеспечение. Проектирование изделия с помощью CAD/CAM/CAE технологий дает возможность сократить затраты времени на разработку и корректировку, как конструкции изделия, так и управляющих программ. Наличие 3D модели изделия, позволяет использовать ее при проектировании специализированных приспособлений и инструмента, что в свою очередь позволяет использовать весь комплект разработанных электронных моделей при технологической подготовке производства для верификации управляющих программ и проверки инструмента на столкновение с рабочими органами станка, приспособлениями и деталью.

По поступившей от разработчика в бумажном и электронном виде конструкторской документации было решено провести комплекс работ по подготовке производства с максимальным использованием возможностей электронного моделирования.

Функционально ШВП (шарико-винтовая передача) служит для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное.

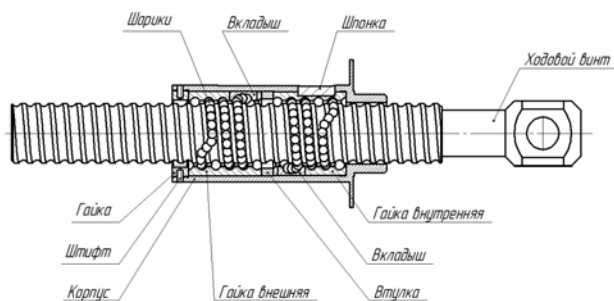


Рис. 1. Шарико-винтовая передача

Конструктивно ШВП состоит из винта и гайки с винтовыми канавками криволинейного профиля. Канавки служат дорожками качения для размещенных между витками винта и гайки шариков. Пере-

мещение шариков происходит по замкнутой траектории – при вращении винта шарики вовлекаются в движение по винтовым канавкам, поступательно перемещают гайку и через перепускной канал (канал возврата) возвращаются в исходное положение. Каналы возврата выполняются в специальных вкладышах, которые вставляются в соответствующее окно гайки, по числу рабочих витков.

Благодаря компактным размерам и простоте конструкции ШВП могут быть легко интегрированы в различные машины и механизмы, в том числе с гидравлическим и пневматическим приводом [1].

В качестве инструментов для конструкторской проработки был выбран программные продукты компаний «Dassault Systemes SolidWorks Corp.», «Deltcam» и другие.

При создании 3D сборки из присланных моделей деталей по конструкторской документации сразу выявились недостаточная проработка конструкции некоторых элементов, в частности детали «Вкладыш» (рис. 2 и 3), являющейся одной из наиболее ответственных деталей и служащей для возврата шариков в рабочий виток. Величина уступов в канале достигала 0,2 мм, что могло привести к заклиниванию шарико-винтовой пары в худшем случае или к значительному увеличению времени прикатки в лучшем случае.

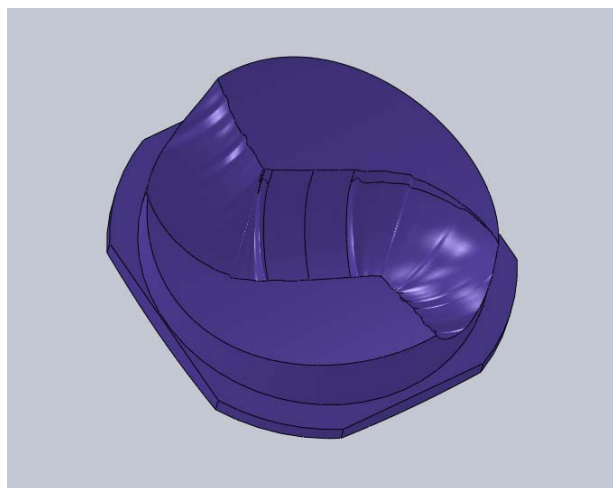


Рис. 2. 3D модель детали «Вкладыш» по конструкторской документации

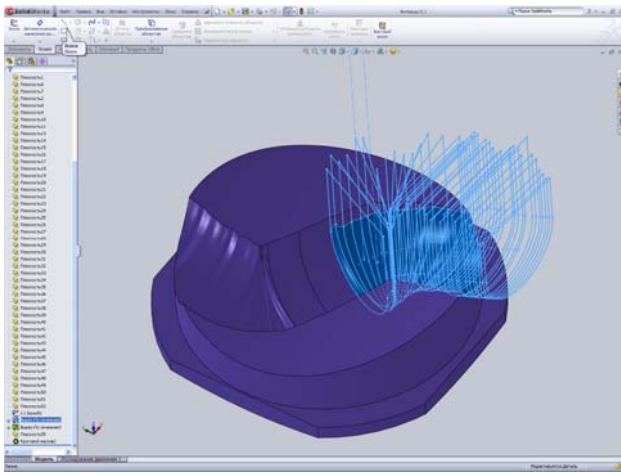


Рис. 3. Траектория движения шарика в канале детали «Вкладыш» по конструкторской документации

Специалистами предприятия было принято решение откорректировать конструкцию перепускного канала в детали «Вкладыш» (рис. 4). Для этого была просчитана траектория движения шарика в канале вкладыша. Так как конструкция детали симметрична, то траектория рассчитывалась только для правой половины детали, с последующим симметричным копированием.

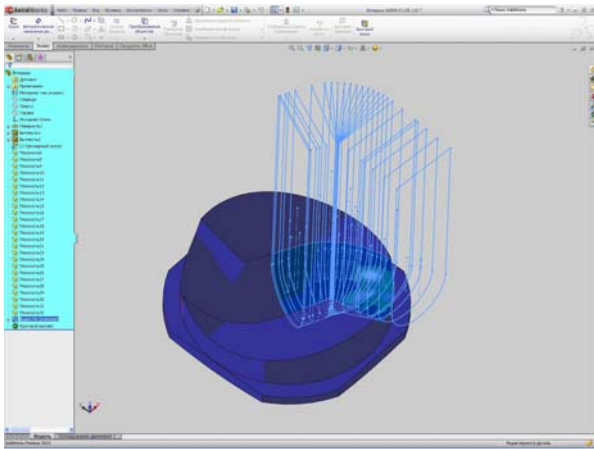


Рис. 4. Траектория движения шарика в детали «Вкладыш», разработанная специалистами предприятия

Полученная в результате расчетов и построения конструкция канала вкладыша обеспечила максимальные уступы в пределах 0,005 мм. Полученная конструкция канала (рис. 5) значительно облегчает сборку и особенно прикатку шарико-винтовой пары, до требуемых значений момента торможения и начала движения.

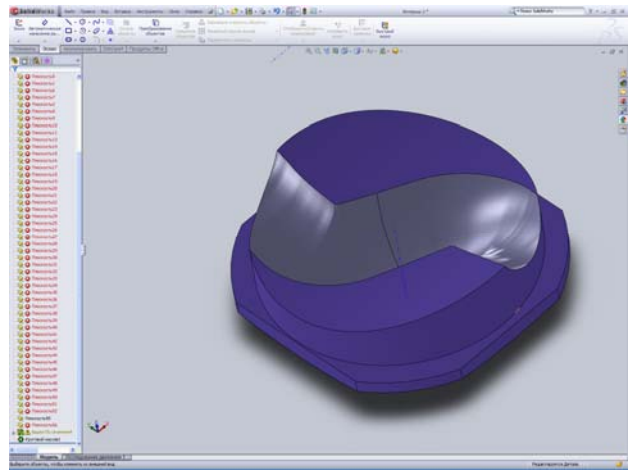


Рис. 5. 3D модель детали «Вкладыш», разработанная специалистами предприятия

Окончательно, конструкция детали вкладыш была проверена на работоспособность с определением конфликтов с другими компонентами (шарик) при перемещении или вращении компонента (рис. 6). Модуль позволил определить наличие конфликтов в собранном состоянии или с выбранной группой компонентов. Можно найти конфликты или для выбранного компонента, или для всех компонентов, которые перемещаются в результате сопряжений с выбранными компонентами. Кроме этого использовался параметр «физическая динамика», который позволяет увидеть реалистичное движение компонентов сборки. Если физическая динамика включена, во время перетаскивания компонент сообщает некоторое усилие всем смежным компонентам и перемещает компоненты, если их перемещение невозможно.

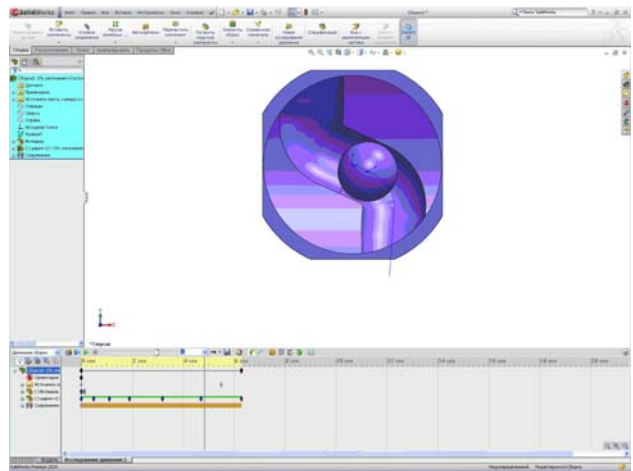


Рис. 6. Исследование движения шарика в канале детали «Вкладыш»

Следующим этапом проверки детали «Вкладыш» на правильность конструкции стала проверка в сборе с деталью «Гайка» (рис. 7). Эта сборка также была проверена на работоспособность с определением

ем конфликтов при перемещении или вращении компонента. Проверка производилась по одному витку, так как описание траектории движения шарика достаточно трудоемкий и сложный процесс.

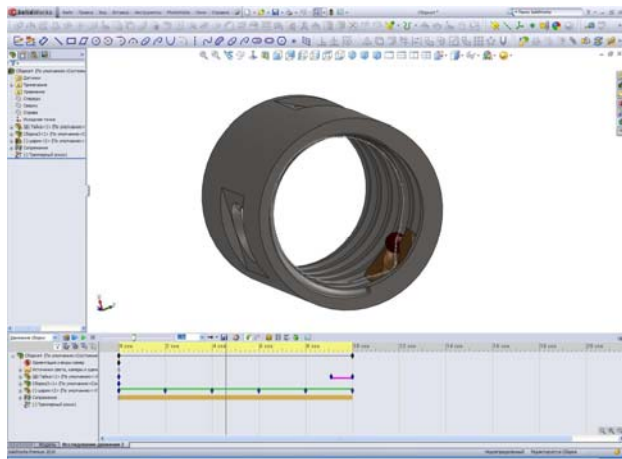


Рис. 7. Исследование движения шарика в сборке деталей «Вкладыш» и «Гайка»

Последним этапом проверки шарико-винтовой пары на работоспособность была сборка винта, двух гаек, шести вкладышей, втулки и комплекта шариков (рис. 8). Эта сборка также была проверена на работоспособность с определением конфликтов с другими компонентами при перемещении или вращении компонента.

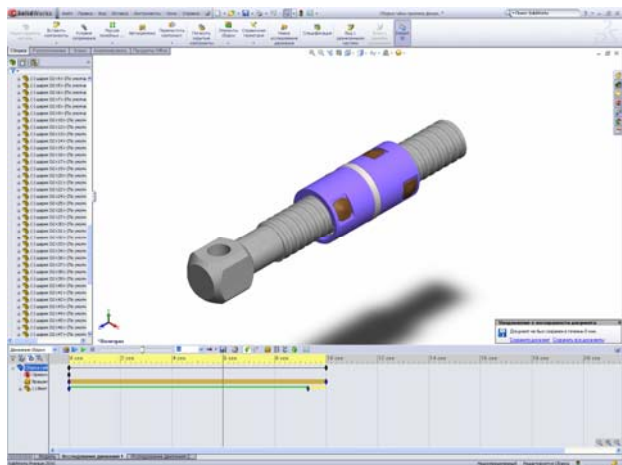


Рис. 8. Исследование движения шарико-винтовой пары

Результаты компьютерной проработки конструкции шарико-винтовой передачи позволили изготовить работоспособную конструкцию в сжатые сроки. Затраченные при этом ресурсы оказались незначительными по сравнению с возможными затратами на повторное изготовление опытных образцов шарико-винтовых пар.

После уточнения конструкторской документации началась технологическая подготовка производства, включающая в себя разработку технологиче-

ской документации, конструкторской документации на приспособления и управляющих программ для станков с ЧПУ.

Прохождение конструкторско-технологической документации осуществлялось в системе документооборота «Т-Flex DOCs» компании «Топ Системы» (примеры представлены на рис. 9–11). Использование системы документооборота позволило сократить время на прохождение конструкторско-технологической документации с нескольких дней до нескольких часов.

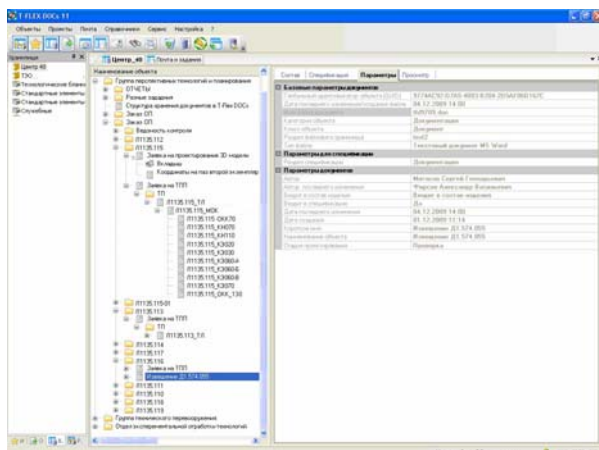


Рис. 9. Структура хранения документации по изготовлению шарико-винтовой пары

Как видно из рис. 9, система «Т-Flex DOCs 11» компании «Топ Системы», вполне совместима с подавляющим большинством используемых форматов.

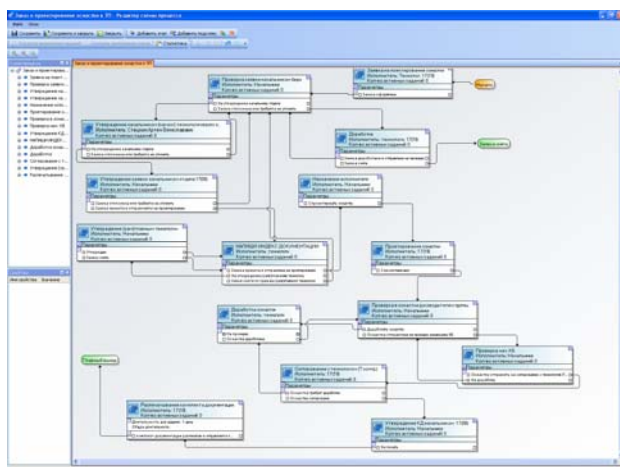


Рис. 10. Структура прохождения одного из документов по изготовлению шарико-винтовой пары



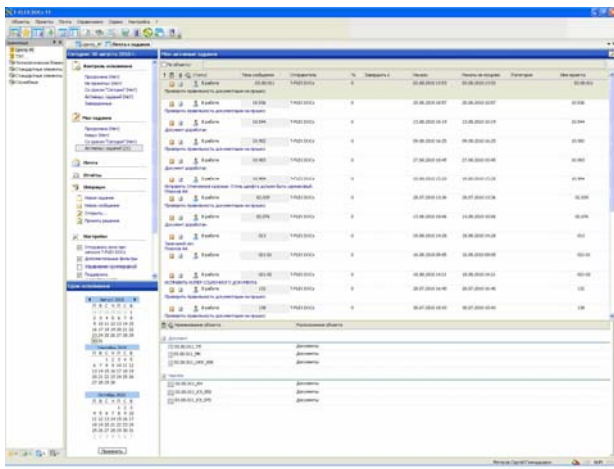


Рис. 11. Окно заданий на выполнение

Разработка управляющих программ осуществлялась с использованием разработанных ранее 3D моделей в программе «PowerMill» (рис. 12–13).

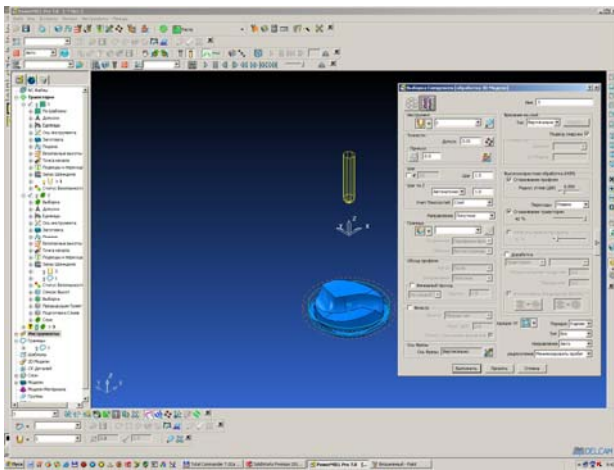


Рис. 12. Разработка управляющей программы

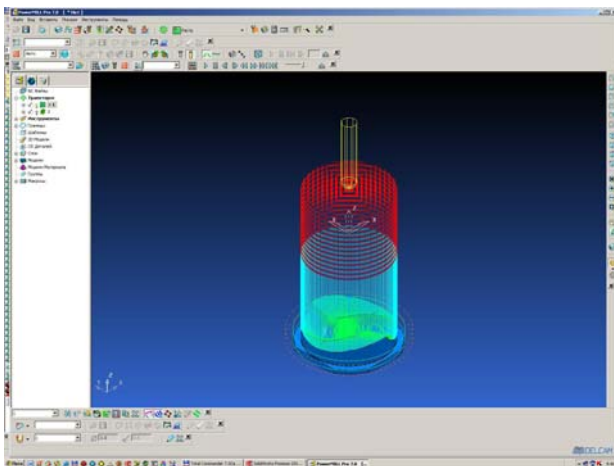


Рис. 13. Траектория движения фрезы

Контроль изготовления деталей так же осуществлялся с использованием 3D моделей на координатно-измерительной машине «Global» (рис. 14).

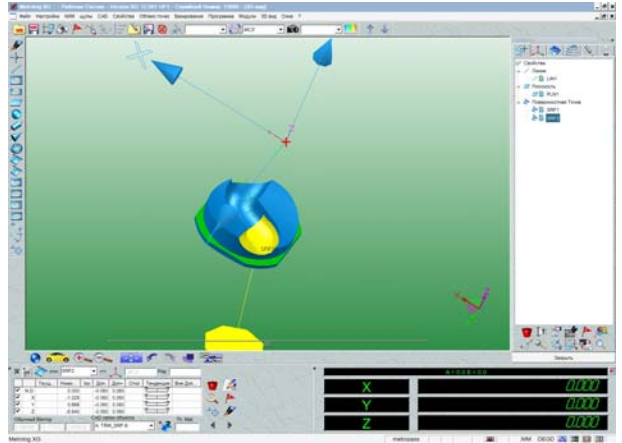


Рис. 14. Контроль параметров детали «Вкладыш»

Результаты изготовления опытной партии шарико-винтовой передачи показали, что:

1. Доработка, конструкторской документации не понадобилась.
2. Достигнута 100 % взаимозаменяемость деталей.
3. Доработка при сборке не требуется.
4. Время прикатки уменьшилось в 2,5–3 раза, по сравнению с предыдущей версией шарико-винтовой пары.
5. 3D модели использовались при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.
6. 3D модели использовались при проверке управляющих программ станков с ЧПУ на столкновения.
7. 3D модели использовались при контроле на координатно-измерительной машине.

По результатам технологической подготовки производства и изготовления опытной партии изделия можно сделать вывод, что время затраченное на проработку конструкции и технологии изготовления с помощью современного программного обеспечения сэкономило материальные ресурсы более чем в 4 раза. Время затраченное, от получения конструкторской документации до выхода готового изделия, уменьшилось более чем в 2 раза, при тех же затратах человеческих ресурсов.

## Литература

1. Расчет и конструирование передач винт-гайка качения / Руководящие материалы под ред. Г. А. Левитом. М. 1964.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора машиностроителя: в 3 т. М.: Машиностроение, 2003.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

*Е. В. Кириленко, М. В. Безрученков*

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва

В данной работе рассматривают возможности метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для контроля качества различных материалов, применяемых в производстве полупроводниковых приборов: кремниевых кристаллов, металлов и сплавов, кремнийорганических и эпоксидных компаундов. Рассматривается влияние параметров эксперимента, таких как атмосфера измерительной ячейки, скорость нагрева на качество полученных результатов.

Обсуждается возможность применения метода модулированной ДСК (МДСК) для исследования теплофизических характеристик применяемых материалов.

Дифференциальная сканирующая калориметрия – метод, основанный на измерении разницы тепловых потоков, идущих от испытуемого образца и образца сравнения. Получаемая информация позволяет определять характер протекающих процессов и характеризовать свойства испытуемого материала. Это универсальный, надежный и наиболее востребованный метод термического анализа. С помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) можно определить множество разнообразных величин, характеризующих свойства веществ и материалов и представляющих интерес, как для теории, так и для практики. ДСК позволяет, например, измерить характеристические температуры и выделяемое или поглощаемое теплофизических процессов или химических реакций, происходящих в образцах твердых тел и жидкостей при их контролируемом нагреве или охлаждении. Быстрота получения результатов анализа, большое значение для решения исследовательских задач и контроля качества сырья и продукции, удобство в обращении обуславливают его возрастающую роль в исследовании веществ и материалов.

Использование методов ДСК дает возможность определять:

- плавление-кристаллизацию;
- фазовые диаграммы;
- переходы в жидких кристаллах;
- чистоту материалов;
- кристалличность полукристаллических материалов;
- соотношение твердое тело-жидкость;
- фазовые переходы в твердом теле;

- переходы стеклования;
- удельную теплоемкость;
- структурообразующие реакции;
- окислительную стабильность;
- начало разложения.

Во ВНИИА использование метода ДСК для осуществления дополнительного контроля на различных стадиях технологического процесса герметизации полупроводниковых приборов [1].

В целях комплексного контроля качества материалов, применяемых в производстве полупроводниковых приборов, проводилось определение физико-химических характеристик следующих составных частей и материалов, входящих в состав полупроводниковых приборов: кремниевых кристаллов, металлов и сплавов, кремнийорганических и эпоксидных компаундов. Измерение методом ДСК проводилось на дифференциально-сканирующем калориметре Q200 TA Instruments. DSC Q200 обеспечивает высокое качество экспериментальных данных как с точки зрения разрешения, так и с точки зрения спецификации базовой линии. Конструкция ячейки представлена на рис. 1.

Измерительная ячейка ДСК состоит из двух нагревателей. На один из них мы помещаем тигель с образцом, на другой пустой тигель, который служит для сравнения. С помощью компьютера включаем оба нагревателя и нагреваем тигли со скоростью 10°C в минуту. Компьютер следит за тем, чтобы скорость нагревания оставалась одинаковой в течение всего эксперимента. Таким образом, мы получаем график зависимости выделяемого тепла с повышением температуры.

Представленные в докладе вещества можно разделить на три класса:

1. Неорганические соединения, которые изначально не имеют переходов, обусловленных изменением физико-химических свойств. Контроль качества таких соединений осуществляется методом ДСК по наличию несвойственных данным веществам переходов, т. е. если на термограмме присутствуют изменения по сравнению с термограммой эталонного вещества, это говорит либо о загрязненности, либо о наличии посторонних включений, либо о фальсификации материала.

2. Неорганические соединения, которые имеют переходы. Контроль качества осуществляется по

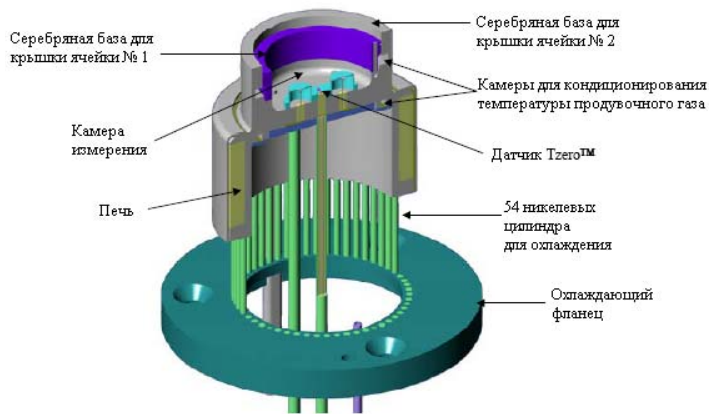
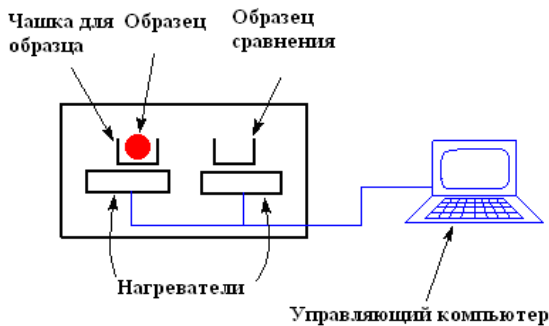


Рис. 1. Схема измерения методом ДСК и конструкция ячейки калориметра Q200

«пикам плавления». Эти пики говорят о качестве приготовления и чистоте сплава. Чем чище вещество, тем больше площадь пика эндотермического пика плавления и, соответственно, теплота плавления ( $Q$ , Дж/г). О наличии загрязнений может свидетельствовать уширение пика, т. е. увеличение отношения высоты пика к его полуширине.

3. Органические соединения. Они имеют ряд релаксационных переходов, которые характеризуют степень сшивки и структурообразующую сетку компаунда. Выше определенной температуры у компаунда на воздухе наблюдается процесс термоокисления. Присутствует некоторая корреляция между наличием остаточных релаксационных групп и характером протекания термоокислительной деструкции, что сказывается на экзотермическом пике разложения. Следует отметить, что при большем повышении температуры в компаунде отслеживается разрыв цепей и дальнейшая сшивка по малореакционноспособным группам. Происходит принудительная поликонденсация.

К первому классу соединений мы относим ковар, алюминий, теплопроводную керамику и кристаллический кремний, термограммы которых представлены на рис. 2–4. Как видно из термограмм соединения не содержат в себе посторонних включений. На рис. 3 представлена термограмма двух последовательных экспериментов по определению теплофизических свойств образца нитрида алюминия. Два эксперимента необходимы, если поверхность исследуемого образца загрязнена, тогда в процессе первого нагрева в воздушной среде органические примеси, привнесенные извне, подвергнутся процессу термоокислительной деструкции и их влияние на термограмму второго эксперимента будет исключено. На рис. 3.1 представлены термограммы двух последовательных нагревов образцов  $AlN$  и  $Al_2O_3$ , которые представляют собой наглядный пример присутствия посторонних включений в исследуемом материале в процессе первого нагрева, которых на термограмме второго нагрева уже нет.

Для анализа процессов, происходящих при повышении температуры, систем устойчивых к нагреванию, таких как металлы и керамика, удобно использовать метод вычитания термограмм первого и второго нагрева (рис. 3.2). Предполагая, что при нагревании органические вещества, являющиеся сторонними примесями в резистивной системе, претерпевают термоокислительную деструкцию, можно сделать вывод, что термограмма второго нагрева будет описывать теплофизические свойства таких систем без загрязнений, а разница термограмм будет представлять термограмму органических загрязнений с четко выраженными пиками стеклования, разложения и другими переходами присущими органическим и полимерным системам. Надо отметить, что в случае пористой керамики загрязнения могут присутствовать не только на поверхности, но в пустотах и методы очистки растворителями могут быть не эффективными.

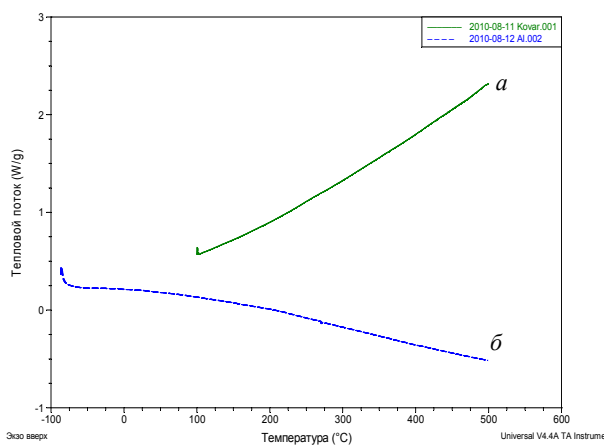
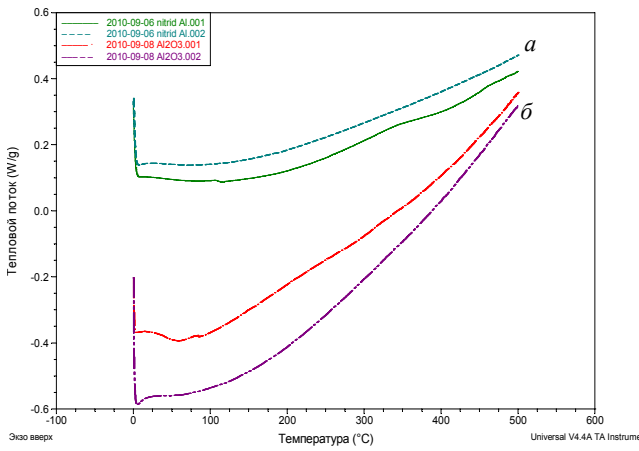
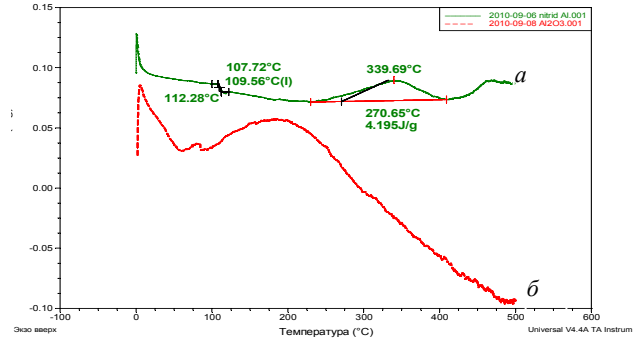


Рис. 2. Термограммы образцов металлов: а – ковара, б – алюминия

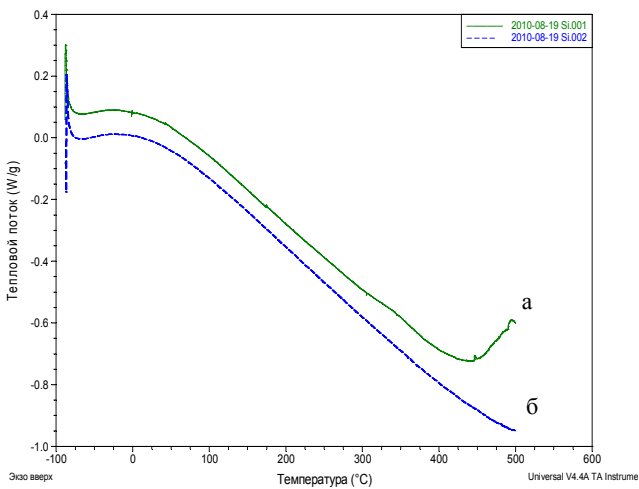


3.1

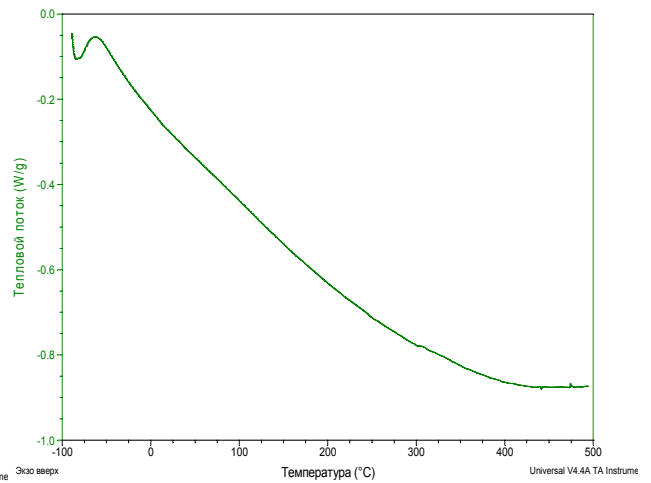


3.2

Рис. 3. Термограммы образцов теплопроводной керамики: 3.1 – два последовательных нагрева образца AlN (а) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (б) от 0 до 500 °С; 3.2 – результат вычитания термограмм первого и второго нагрева образца AlN (а) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (б)



4.1.



4.2.

Рис. 4. Термограммы образцов кристаллического кремния: 4.1: а – первый нагрев образца; б – второй нагрев образца; 4.2 – образец кристаллического кремния, нагретый в среде азота

Ко второму классу мы отнесли различные эвтектические припои: Pb-Sn, Al-Ge, Ga-Ni. Термограммы представлены на рис. 5.

Рассмотрим термограмму а) рис. 5. На ней мы наблюдаем 5 пиков (пики № 1–5), которые идентифицируют различные теплофизические процессы, происходящие с изменением температуры. При температуре 49,66 °С, 141,58 °С и 380,03 °С, пики № 1, № 2 и № 4 соответственно, в диффузионном припое происходит процесс плавления. При температуре 263,56 °С (пик № 3), происходит фазовое изменение состава: Ga диффундирует в Ni с образованием серого порошка и происходит разрушение кристаллической решетки холодного сплава.

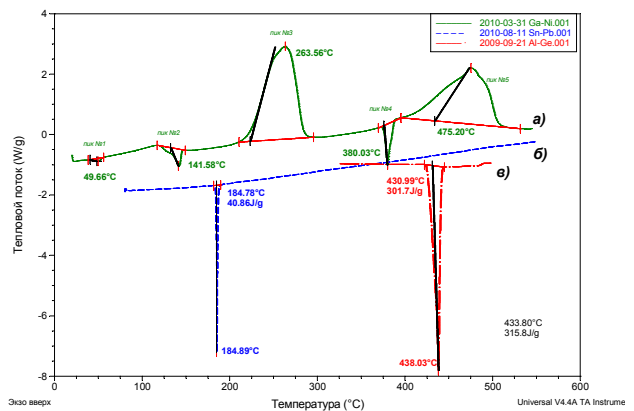


Рис. 5. Термограммы образцов эвтектических припоев а) Ga-Ni, б) Sn-Pb, в) Al-Ge



Качество эвтектических припоев Pb-Sn и Ge-Al оценивается по площади «пиков плавления» (термограммы *б*) и *в*) рис. 5). На рис. 6 для сравнения представлены сравнительные термограммы эвтектического припоя Al-Ge *а*) удовлетворительного и *б*) не удовлетворительного качества, а результаты измерений представлены в табл. 1.

Как видно, визуально из приведенных термограмм рис. 5 и 6 и по расчетам из табл. 1, площадь пиков плавления образцов удовлетворительного качества значительно превышает площадь пиков образцов не удовлетворительного, что свидетельствует о присутствии посторонних примесей в сплавах.

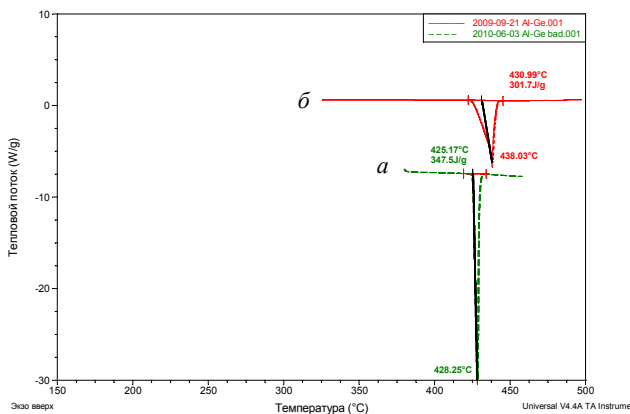


Рис. 6. Сравнение образцов эвтектического припоя Al-Ge: *а* – удовлетворительного и *б* – не удовлетворительного качества

Таблица 1

Сравнение образцов диффузионного припоя Al-Ge

		$T_{\text{нач.разл.}}$ , °C	$Q_{\text{разлож.}}$ , Дж/г	$T_{\text{разлож.}}$ , °C
Al-Ge	Удовлетворительного качества	425,2	347,5	428,3
	Неудовлетворительного качества	430,9	301,7	438,0

К третьему классу относятся эпоксидные и кремнийорганические компаунды. Контроль качества эпоксидных компаундов осуществляется по температуре плавления. Годным признается компаунд, у которого минимум эндотермического пика находится в интервале температур от  $-44$  до  $-46$  °C, а площадь эндотермического пика составляет 16–17 Дж/г.

Рассмотрим рис. 7, на котором представлены термограммы образцов кремнийорганических компаундов. Присутствие эндотермических пиков в интервале температур  $-48$  ÷  $-49$  °C говорит о процессах плавления, происходящих в представленных образцах, а подъем кривой вверх на термограммах для образцов КЭН-3С и КЛТ-30 означает начало процесса разложения.

Для образца ГКН (термограмма *в* рис. 7) процесс разложения не наблюдается, т. к. измерения проводились в среде азота. Отсутствие разложения в среде азота говорит о термоокислительном характере деструкции кремнийорганических компаундов.

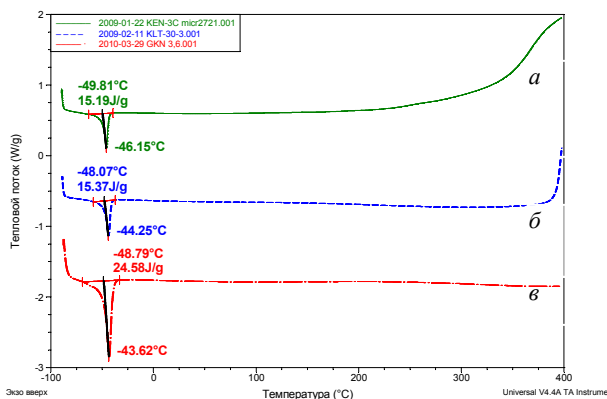


Рис. 7. Термограммы образцов кремнийорганических компаундов: *а* – КЭН-3С, *б* – КЛТ-30, *в* – ГКН

На рис. 8 представлены эпоксидные герметизирующие компаунды с наполнителями после отверждения. Контроль качества осуществляется по температуре стеклования. Для каждого компаунда свой диапазон стеклования, характерный для данного компаунда, приготовленного в соответствии с технологическим процессом. Если температура стеклования ниже диапазона, то это говорит о нарушении технологического процесса, например, изменение температурного режима, ошибка в рецептуре, некачественные компоненты (например, эпоксидная смола с меньшим эпоксидным числом), наличие посторонних примесей и т. п. Увеличение температуры стеклования выше указанного диапазона, как правило, наблюдается в готовом изделии, после прохождения различных испытаний и говорит о термическом воздействии сверх регламентируемого диапазона.

Как видно из рис. 8 для образцов ЭКМ, ТК-30 и ЭК-29М температура стеклования практически не отслеживается, что связано с наличием большого количества наполнителей в составе компаундов.

Использование МДСК часто помогает идентифицировать процессы, не фиксируемые с достаточной степенью точностью при линейном немодулированном нагреве, т. к. в процессе МДСК используется более сложный температурный режим по сравнению с обычной ДСК: синусоидальные модуляции накладываются на обычный линейный нагрев или охлаждение, приводя к тому, что окружающая образец температура меняется скорее синусоидально, чем линейно. Эффект этого процесса можно сравнить с эффектом от одновременного запуска двух процессов: обычного линейного нагрева образца и синусоидального (мгновенного) нагрева.

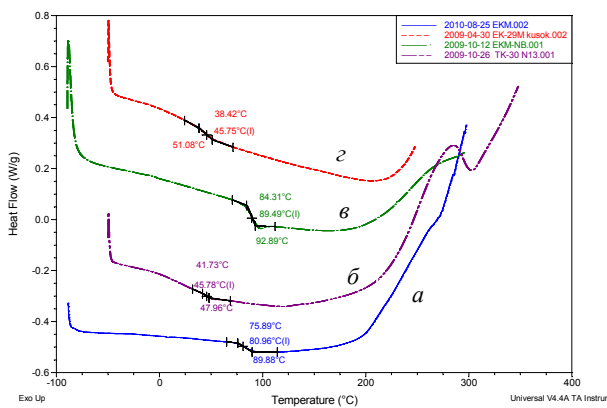


Рис. 8. Термограммы образцов эпоксидных компаундов: *a* – ЭКМ, *б* – ЭК-29М, *в* – ЭКМ-НБ, *z* – ТК-30

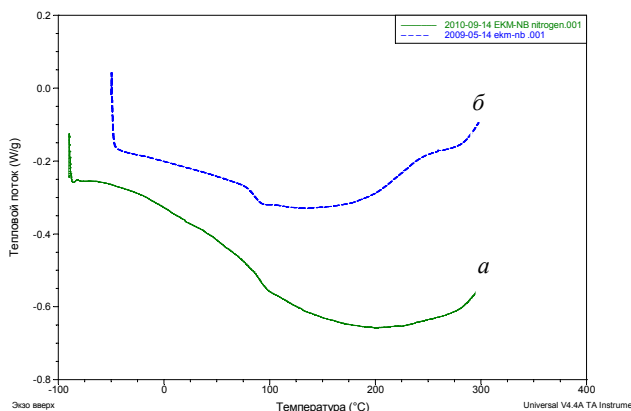


Рис. 9. Термограмма образца ЭКМ-НБ, сделанная в среде: *a* – азота, *б* – воздуха

На рис. 9 приведены термограммы образцов компаунда ЭКМ-НБ сделанные в среде азота и воздуха. Как мы видим на термограмме *a* рис. 9 отсут-

ствует процесс горения концевых -ОН групп, тогда как на термограмме *б* рис. 9 он присутствует в виде экзотермического пика.

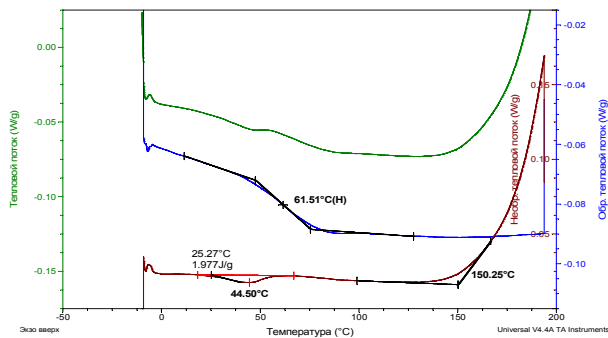


Рис. 10. Термограммы компаунда ТК-30, снятые в режиме МДСК со скоростью 3 град/мин

На рис. 10 представлены термограммы компаунда ТК-30 снятые в режиме МДСК. При использовании модулированного режима на кривой обратимого теплового потока четко фиксируется температура стеклования 61,5 °С, а на кривой необратимого теплового потока выявляется процесс релаксации энтальпии при 44,5 °С и температура начала разложения 150 °С.

Модулированный режим применяется также для определения теплоемкости материалов, что необходимо для расчета параметров микросхем. В табл. 2 приведены значения теплоемкости материалов, применяемых во ВНИИА.

При термическом воздействии на материалы имеют место два конкурирующих процесса – плавление одних кристаллитов (эндотерма обратимого теплового потока) и кристаллизация других (экзотерма необратимого теплового потока), т. к. изменение релаксационных процессов имеют сугубо обратимый характер, то удобно выделить из общего теплового потока его обратимую составляющую.

Таблица 2  
Теплоемкость материалов, применяемых во ВНИИА для производства полупроводниковых приборов, определенная с помощью МДСК

Материалы		$c_{обр},$ Дж/(г*°С)	$c,$ Дж/(г*°С)	
Теплопроводная керамика	AlN	0,62	0,54	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,18	0,93	
Металлы	Al	0,80	0,79	
	Ковар	0,47	0,40	
Припой	Al-Ge	0,84	0,78	
	Pb-Sn	0,32	0,31	
Компаунды	Кремний-органические	КЛТ-30	0,88	0,93
		КЭН-3С	1,30	0,79
	Эпоксидные герметизирующие	ЭКМ-НБ	1,31	1,08
		ТК-30	1,59	1,31
		ЭК-29М	0,94	1,02
	ЭКМ	1,29	1,14	

## Выводы

1. С помощью метода ДСК можно оценивать изменение теплофизических характеристик материала в зависимости от его чистоты, наличия в нем примесей и загрязнений, поэтому он может быть использован в качестве дополнительного метода входного контроля материалов.

2. Метод ДСК является эффективным методом контроля качества отверженных кремнийорганических и эпоксидных компаундов.

3. Для компаундов с большой степенью наполненности используют более точный метод модулированной ДСК.

## Литература

1. Безрученков М. В., Ватопедский А. Н. Контроль параметров герметизирующих компаундов методами ДСК и ИК-Фурье спектроскопии и разработка перспективных методик оценки качества технологических процессов. УДК 621.382.

2. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение. Л.: ГСИ судостроительной промышленности, 1963.

3. Фридман Е. И. Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1978.

# НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ

М. А. Клеши́ва

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## 1. Введение

Последнее десятилетие характеризуется широкой компьютеризацией работ по проектированию и изготовлению изделий основного производства. На предприятиях ЯОК ведется разработка электронных справочников, создание электронных баз данных в условиях функционирования ИПИ – технологий, которые должны повысить качество и надежность разрабатываемых изделий, а также производительность инженерного труда.

Представляется целесообразным при проведении указанных работ эффективно использовать нормативную документацию по технологичности конструкции изделий, действующую на предприятиях ЯОК.

## 2. Условные сокращения

**ИПИ-технологии** – технологии информационной поддержки жизненного цикла изделия;

**ГСС** – государственная система стандартизации;

**ТКИ** – технологичность конструкции изделий;  
**КД** – конструкторская документация;  
**НД** – нормативный документ;  
**ЕСТПП** – единая система технологической подготовки производства;  
**ОСТ** – стандарт отрасли;  
**РТМ** – руководящий технический материал;  
**РД** – руководящий нормативный документ;  
**ЯОК** – ядерный оружейный комплекс;  
**СКБ** – серийное конструкторское бюро;  
**ОБД** – общая база данных;  
**НКБС** – научно-конструкторское бюро стандартизации.

## 3. Основные понятия о технологичности

В настоящем докладе применены следующие термины с соответствующими определениями по ГОСТ 14.205 – 83 «Технологичность конструкции изделий. Термины и определения», указанные в таблице 1.

Таблица 1

Основные понятия о технологичности

Термин	Определение
<b>Технологичность конструкции изделия</b>	Совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ
<b>Обеспечение технологичности конструкции изделия</b>	Функция подготовки производства, включающая комплекс взаимосвязанных мероприятий по управлению технологичностью и совершенствованию условий выполнения работ при производстве, эксплуатации и ремонте изделий
<b>Отработка конструкции изделия на технологичность</b>	Часть работ по обеспечению технологичности, направленная на достижение заданного уровня технологичности и выполняемая на всех этапах разработки изделия
<b>Технологический контроль КД</b>	Контроль КД, при котором проверяется соответствие конструкции изделия требованиям технологичности
<b>Производственная технологичность конструкции изделия</b>	Технологичность конструкции изделия при технологической подготовке производства, изготовлении, а также монтаже вне предприятия – изготовителя
<b>Эксплуатационная технологичность конструкции изделия</b>	Технологичность конструкции изделия при подготовке его к использованию по назначению, техническом обслуживании, текущем ремонте и утилизации

#### 4. Краткие сведения о разработке нормативных документов по обеспечению технологичности конструкции изделий

Государственные стандарты по обеспечению ТКИ были разработаны и введены в действие с 01.01.1975 г. в составе комплекса государственных стандартов ЕСТПП и регламентировали:

- общие правила, количественные оценки, последовательность и содержание работ, а также рекомендуемый перечень показателей технологичности изделий (ГОСТ 14.201–73);

- правила выбора показателей, виды технологичности (ГОСТ 14.202–73);

- правила обеспечения технологичности конструкций сборочных единиц и деталей (ГОСТ 14.203 – 73, ГОСТ 14.204 – 73);

- требования к проведению технологического контроля конструкторской документации (ГОСТ 14.206 – 73).

При пересмотре государственных стандартов ЕСТПП в середине 1980 г. ГОСТ 14.202 – ГОСТ 14.204 были отменены, а взамен им были разработаны методические рекомендации МР 186 – 85 «Обеспечение технологичности конструкций изделий машиностроения и приборостроения». Одновременно был вновь разработан ГОСТ 14.205 – 83 «Технологичность конструкций изделий. Термины и определение».

Планомерная разработка отраслевых НД по обеспечению ТКИ на предприятиях отрасли в виде ОСТ (РТМ, РД) началась с 1969 г. Решением секции 6 НТС – 2 к разработке НД были привлечены технологические службы серийных предприятий, поэтому в документах были учтены тонкости серийной технологии изготовления изделий. На специально проведенном в НКБС совещании ответственных представителей серийных предприятий (протокол № 682 от 18.06.1969 г.) была определена номенклатура отраслевых нормативных документов по ТКИ и закреплены ответственные предприятия за их разработку.

Главным содержанием работ по нормативному обеспечению ТКИ стала разработка основополагающих НД, устанавливающих:

- показатели технологичности изделий и методу их расчета;

- порядок проведения технологического контроля КД;

- требования к проектированию и изготовлению деталей, соединений, сборочных единиц.

В настоящее время в отрасли действует 22 НД по ТКИ.

### 5. Действующие НД по ТКИ

#### 5.1. Показатели технологичности конструкции изделий и методы их оценки

ОСТ 95 1139 – 88 «ТКИ. Показатели технологичности. Методы оценки» устанавливает показатели и методы оценки производственной технологичности конструкции изделий, КД которых подлежат передаче в серийное производство.

Ответственным за организацию работ по определению показателей технологичности является разработчик КД, а на серийном предприятии – СКБ. В необходимых случаях разработчик КД привлекает к определению показателей технологические службы предприятия.

Установлены следующие показатели технологичности:

- трудоемкость изготовления ( $T_n$ );

- комплексный показатель технологичности ( $K_T$ );

- коэффициент использования материала ( $K_{им}$ );

- коэффициент прогрессивности технологии ( $K_{пт}$ );

- коэффициент унификации материалов ( $K_{ум}$ );

- коэффициент автоматизации контрольных операций ( $K_{авт.ко}$ );

- коэффициент механизации и автоматизации процессов изготовления ( $K_{ма}$ ).

Расчет показателей технологичности производится на следующих стадиях разработки рабочей КД изделий: опытный образец, серийное производство. Результаты расчета оформляют в виде ведомости показателей технологичности, которая входит в комплект КД на изделие. Передача подлинников ведомости показателей технологичности на серийные предприятия производится совместно с комплектом КД на изделие. Определение показателей технологичности изделия в серийном производстве производят через 1 и через 3 года после начала его изготовления, а в последующем – по мере необходимости или по запросам руководителей управлений и разработчиков КД.

#### 5.2. Технологический контроль конструкторской документации

ОСТ 95 1137 – 73 «ТКИ. Порядок проведения технологического контроля конструкторской документации» разработан в дополнение ГОСТ 14.206 – 73 и устанавливает порядок проведения технологического контроля КД, направленного на обеспечение технологичности на стадиях разработки эскизного (технического) проекта, рабочей документации опытного образца и рабочей документации серийного производства.

Стандарт содержит:

- требования к технологичности с точки зрения конструкции изделия и технологии его изготовления;

- требования, которыми необходимо руководствоваться в процессе разработки КД и при проведении ее технологического контроля;

- порядок проведения технологического контроля на следующих стадиях разработки КД: эскиз-

ный (технический) проект, рабочая документация опытного образца, серийное производство;

– сроки проведения технологического контроля КД;

– порядок реализации замечаний серийного предприятия по КД.

### **5.3. Требования к технологичности конструкции деталей**

В настоящее время действуют НД, устанавливающие требования к технологичности конструкции деталей:

• **РД 95 3190 – 91 «ТКИ. Детали литые»** устанавливает требования к технологичности конструкций литых деталей, выбору способа литья, к разработке чертежей отливок и литых деталей;

• **РТМ 95 3176 – 73 «ТКИ. Детали, получаемые холодной штамповкой»** устанавливает рекомендации для выбора рациональных материалов, баз, форм и элементов холодноштампуемых деталей и технические требования при проектировании, изготовлении и контроле наиболее экономичных конструкций изделий, изготавливаемых штамповкой из листа и объемной штамповкой;

• **РТМ 95 3188 – 74 «ТКИ. Детали, получаемые горячей штамповкой»** устанавливает технологичность конструкции деталей, получаемых горячей штамповкой, общие рекомендации по выбору материалов и форм поковок, требования к разработке рабочих чертежей поковок;

• **РТМ 95 3254 – 81 «ТКИ. Детали, получаемые штамповкой взрывом»** устанавливает требования, обеспечивающие технологичность конструкции деталей, получаемых штамповкой взрывом, и общие рекомендации при их проектировании и изготовлении, требования к конструкции деталей, типовые элементы штампуемых деталей;

• **РТМ 95 3257 – 81 «ТКИ. Корпусные детали приборного производства из цветных сплавов, получаемые методом объемной штамповки»** устанавливает требования к технологичности конструкций осесимметричных корпусных деталей приборного производства из цветных сплавов, выбору материала, требования к разработке рабочих чертежей;

• **РТМ 95 3165 – 73 «ТКИ. Детали, подвергаемые термической обработке»** устанавливает технологичность конструкции деталей, подвергаемых термической обработке, требования к деталям, их поверхностям, подвергаемым химико-термической обработке и поверхностной закалке с применением нагрева токами высокой частоты, а также регламентирует классификацию изделий по признаку деформируемости;

• **РТМ 95 3184 – 86 «ТКИ. Детали, подвергаемые механической обработке»** устанавливает требования по выбору материалов, баз и форм элементов при проектировании и изготовлении изделий, подвергаемых механической обработке,

• **РД 95 3274 – 84 «ТКИ. Детали, обрабатываемые на станках фрезерно-расточной группы с ЧПУ»** устанавливает требования к конструкции деталей, обрабатываемых на станках фрезерно-расточной группы с ЧПУ, а также требования к оформлению рабочих чертежей;

• **РД 95 3494 – 92 «ТКИ. Детали, обрабатываемые на станках токарной группы с ЧПУ»** устанавливает требования к конструкции деталей, обрабатываемых на станках токарной группы с ЧПУ, а также требования к оформлению рабочих чертежей;

• **ОСТ 95 1135–79 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Требования к выбору»** устанавливает перечень покрытий, разрешенных к применению при разработке КД на изделия основного производства и при замене покрытий в серийном производстве, требования к условным обозначениям и выбору покрытий в зависимости от условий эксплуатации, материала деталей и назначения покрытия;

• **ОСТ 95 1861 – 77 «ТКИ. Изделия, подвергаемые размерной электрохимической обработке»** устанавливает требования, при проектировании и изготовлении изделий, обрабатываемых электрохимическим способом;

• **ОСТ 95 1864 – 77 «ТКИ. Детали, подвергаемые электроэрозионной обработке»** устанавливает требования при проектировании и изготовлении деталей, подвергаемых электроэрозионной обработке;

• **ОСТ 95 2462 – 85 «Изделия, изготавливаемые методом порошковой металлургии. Требования к проектированию»** устанавливает требования при проектировании изделий, изготавливаемых методом порошковой металлургии;

• **ОСТ 95 3161 – 83 «ТКИ. Изделия из пластмасс»** устанавливает требования к технологичности при проектировании изделий из пластмасс, физико-механические и электроизоляционные свойства пластмасс, а также режимы и способы их переработки;

• **РД 95 3173 – 86 «ТКИ. Изделия из резины»** устанавливает требования к технологичности при проектировании и изготовлении изделий из резины, область применения резиновых смесей, их физико-механические и электроизоляционные свойства, а также режимы и способы переработки.

## **6. Требования к технологичности конструкции соединений и сборочных единиц**

В настоящее время на предприятиях ЯОК действуют НД, устанавливающие требования к технологичности конструкции соединений и сборочных единиц:

• **РД 95 3163 – 84 «ТКИ. Конструкции паяные»** устанавливает рекомендации по конструированию технологичных паяных изделий, выбору припоев и флюсов;

• РД 95 3259 – 87 «ТКИ. Сварные конструкции приборного производства» устанавливает требования к технологичности конструкций, подготовке свариваемых кромок, выбору вида и способа сварки изделий приборного производства;

• РТМ 95 3174 – 73 «ТКИ. Конструкции сварные» устанавливает требования к технологичности конструкций, выбору основных и сварочных материалов, подготовке свариваемых кромок, выбору способа и вида сварки, оформлению чертежей конструкций, точности изготовления и выбору баз под сварку;

• РТМ 95 3239 – 78 «ТКИ. Изделия подвергаемые заливке и пропитке компаундами, пенопластами, лаками, маслами» устанавливает требования к ТКИ, подвергаемых заливке и пропитке компаундами, лаками, маслами, а также приводит рекомендации по выбору материалов;

• РД 95 3444 – 89 «ТКИ. Изделия специальные. Порядок обеспечения автоматизации сборочно – монтажных работ» устанавливает порядок обеспечения автоматизации сборочно-монтажных работ специзделий и их составных частей, требования к технологичности деталей и сборочных единиц изделий, а также перечень задач и порядок выполнения требований по обеспечению автоматизации сборочно – монтажных работ.

## 7. Обновление нормативных документов

В соответствии с требованиями отраслевой системы стандартизации НД по ТКИ подлежат своевременному приведению в соответствие с достижениями науки, техники и технологий, а также с требованиями государственных стандартов. Обновление НД по ТКИ проводится по результатам их плановой проверки предприятиями, которые являются ответственными за проверку НД. Планирование работ и методическое руководство по проведению обновления НД осуществляет НКБС.

НД, подлежащие проверке, включают в «План нормативного регулирования» на планируемый год. По результатам проверки НД принимается одно из следующих решений:

- провести изменение НД;
- произвести пересмотр НД с включением темы в «План нормативного регулирования»;
- аннулировать НД, в связи с его неактуальностью и невостребованностью.

Принимаемое решение отражается в акте проверки НД, который утверждает Главный конструктор НКБС.

Состояние работ по обновлению НД по ТКИ в текущей период отражено в таблице 2

Таблица 2

Проверка и пересмотр НД по ТКИ

№ п/п	Обозначение НД	Год последней проверки	Год пересмотра НД	Год очередной проверки
1	ОСТ 95 1135-79	2008		2013
2	ОСТ 95 1137-73	2009	2010	
3	ОСТ 95 1139-88	2006		2011
4	ОСТ 95 1861-77	2006	2010	
5	ОСТ 95 1864-77	2006	2010	
6	ОСТ 95 2462-85	2008		2013
7	ОСТ 95 3161-83	2008	2011	
8	РД 95 3163-84	2006	2010	
9	РД 95 3173-86	2008	2010	
10	РД 95 3190-91	2007		2012
11	РД 95 3259-87	2006		2011
12	РД 95 3274-84	2008		2013
13	РД 95 3444-89	2008	2009	
14	РД 95 3494-92	2009	2010	
15	РТМ 95 3165-73	2010	2011	
16	РТМ 95 3174-73	2008		2013
17	РТМ 95 3176-73	2008		2013
18	РТМ 95 3184-86	2006		2011
19	РТМ 95 3188-74	2006	2010	
20	РТМ 95 3239-78	2008	2010	
21	РТМ 95 3254-81	2008		2013
22	РТМ 95 3257-81	2009	2011	



Проверка НД проводится, как правило, один раз в 5 лет. Главными задачами, которые решаются при проведении проверки НД, являются:

- определение применимости НД на предприятиях ЯОК;
- уточнение действующих (при необходимости) и введение новых прогрессивных требований;
- приведение оформления НД в соответствие с требованиями ГСС;
- подготовка, наряду с бумажным видом, электронной версии НД.

Проверки НД по ТКИ, проведенные в 2006–2010 гг., показали, что указанные документы применяются разработчиками КД и технологическими службами предприятий ЯОК. Реализация результатов проверок осуществляется корректировкой НД по извещениям об изменении. Наиболее сложные и объемные НД подвергаются пересмотру с включением работ в «План нормативного регулирования». Из табл. 2 видно, что 12 НД по ТКИ подлежат пересмотру в 2010 – 2011 гг.. Необходимость пересмотра остальных НД будет определена при проведении очередных плановых проверок в намеченные сроки.

Следует отметить, что проведение проверок НД является неперемным условием поддержания НД по ТКИ на современном техническом уровне.

## 8. Применение нормативных документов по технологичности конструкции изделий в условиях ИПИ-технологий

ИПИ-технологии – это концепция, объединяющая принципы и технологии информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанная на использовании интегрированной информационной среды, обеспечивающая единообразные способы управления процессами и взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков и поставщиков продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала, реализованная в соответствии с требованиями системы международных стандартов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными.

ИПИ-технологии реализуются силами многопрофильных рабочих групп, объединяющих в своем составе экспертов различных специальностей.

Развитие информационных технологий привело к появлению объектно – ориентированного подхода, который позволил адекватно перевести многие процессы, протекающие на предприятии, в виртуальное информационное пространство, что и сделало актуальной всю проблематику, связанную с использованием ИПИ-технологий. Это относится к процессам конструкторской и технологической подготовки производства, в ходе которых создается техническая документация различных видов и назначения, к процессам управления на всех уровнях, в которых по

необходимости приходится иметь дело с большими объемами разнообразной информации.

На рис. 8.1 представлена структура ОБД.

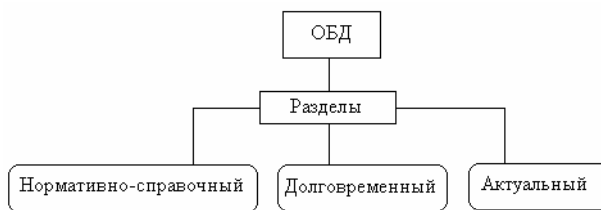


Рис. 8.1. Структура ОБД

В нормативно-справочный раздел вошли НД, сведения о которых обновляются по мере поступления новых, изменений или отмене действующих.

В долговременный раздел должны войти данные, аккумулирующие собственный опыт, типовые решения, методики расчета и т. д.

В актуальный раздел входят данные об изделиях, находящихся на различных стадиях жизненного цикла.

В настоящее время разработана база данных отраслевых НД (ОСТ, РД, РТМ) «БДОНД», представляющий собой нормативно-справочный раздел.

Создание базы данных продиктовано необходимостью внедрения нормативной документации в электронном виде в интегрированную информационную среду, снижения объемов документации в бумажном виде и повышения производительности инженерного труда, так как речь идет о сложной и наукоемкой документации, которая требует создания, преобразования, использования и обмена между различными специалистами больших объемов технической информации.

В состав «БДОНД» включены, в том числе, и НД по ТКИ.

Для эффективного использования НД по ТКИ в составе базы данных следует создать электронные версии документов. Эти работы стали проводиться в настоящее время и планируются на последующие годы (табл. 2).

Вместе с тем, в соответствии с приказом по Госкорпорации «Росатом» от 03.04.2009 № 202 «О реализации Концепции ЯОК Госкорпорации «Росатом» и 12 ГУ Министерства обороны Российской Федерации по внедрению технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий на 2009-2010 гг.» в «Плане нормативного регулирования на 2010 г.» предусмотрена разработка 19 стандартов Госкорпорации «Росатом», ориентированных на применение в интегрированной информационной среде, в числе которых есть ряд различных электронных справочников для использования в условиях ИПИ – технологий.

НД по ТКИ содержат достаточный объем требований к проектированию и изготовлению деталей и соединений. Наименование и укрупненное содержание требований приведены в табл. 3.

## Краткое содержание требований НД по ТКИ

Наименование требований НД по ТКИ	Содержание требований
1	2
Показатели ТКИ	Состав показателей, методы их расчета.
Технологический контроль КД	Заключение о ТКИ
Требования к деталям	Применяемые материалы, выбор значений твердости, конструктивные элементы, выбор баз, точность обработки, шероховатость поверхностей, задание размеров, технологические режимы изготовления, физико – механические и электроизоляционные свойства, основные характеристики металлических и неметаллических неорганических покрытий, ряды предпочтительности применения покрытий
Требования к соединениям	Паяные соединения, выбор припоев и флюсов, физико – механические свойства припоев и флюсов, примеры паяных соединений. Сварные конструкции, конструктивные элементы, оценка свариваемости металлов и сплавов, особенности видов сварки, точность изготовления, выбор баз, простановка размеров, шероховатость. Требования к заливке и пропитке изделий компаундами, пенопластами, лаками, маслами, конструктивные элементы изделий, рекомендации по выбору компаундов, лаков, масел. Требования к обеспечению автоматизации сборочно – монтажных работ, конструктивные элементы

Включение информации таблицы 3 в электронный справочник упростит обмен этой информацией между участниками жизненного цикла изделия и позволит эффективно использовать ее при проектировании и изготовлении изделий.

Целесообразно, на наш взгляд, разработать отдельный справочник, содержащий сведения из НД по ТКИ, с обеспечением возможности вывода этой информации в текстовые и табличные редакторы.

## 9. Выводы и предложения

**9.1.** Разработка и внедрение НД по ТКИ позволили:

- контролировать соблюдение в разрабатываемых изделиях установленных технологических норм и требований с учетом современного уровня развития техники, с привлечением к этой работе технологов серийных предприятий – будущих изготовителей создаваемого изделия;

- обеспечивать достижение в разрабатываемых изделиях заданных показателей технологичности, а также производить оценку технологичности разрабатываемого изделия путем сравнения его с прототипом;

- выявлять на ранних стадиях разработки наиболее рациональные способы изготовления изделия с учетом объема его выпуска.

**9.2.** Действующие НД по ТКИ подвергаются периодической проверке и актуализации на соответствие современному техническому уровню.

**9.3.** Для эффективного использования НД по ТКИ в условиях ИПИ – технологий предлагается:

- провести подготовку электронных версий документов при реализации результатов очередной проверки или при пересмотре НД в сроки, установленные в разделе 7;

- разработку электронных справочников проводить с учетом требований НД по ТКИ;

- рассмотреть вопрос о разработке самостоятельного электронного справочника, содержащего сведения из НД по ТКИ.

## Литература

1. Алферова Т. К., Аминров Ю. Д., Волков П. Н. и др. Технологичность конструкций изделий. М.: Машиностроение, 1985.

2. Левин А. И., Судов Е. В. Концепция развития CALS – технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS – технологий «Прикладная логистика», 2002.

3. Стандарты ЕСТПП.

# РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С. В. Колесников, В. Г. Собынин, А. А. Клопов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время с развитием технологий изготовления высококоэрцитивных магнитов приводы, у которых рабочий угол поворота менее  $180^\circ$ , рационально строить на основе поляризованных электроприводов, так как они имеют высокие удельные силовые характеристики и простую конструкцию. Кроме того, они имеют фиксирующие моменты в крайних положениях, поэтому конструкция электропривода не требует наличия фиксаторов.

Силовые приводы систем автоматики в связи с заданным алгоритмом работы должны иметь как минимум два электрически развязанных канала управления, поэтому, как правило, обмотка такого привода наматывается бифилярным проводом. Поставленные задачи электропривод должен выполнять при работе только от одного канала (половина обмотки не работает).

Цель данной работы – получить с заданными параметрами статические моментные характеристики электро-

привода в одноканальном режиме работы в результате расчета на трехмерной конечно-элементной модели.

## 1. Постановка задачи

Исходной для расчета магнитной системой (МС) поляризованного электропривода является МС [1], которая изображена на рис. 1. Для получения тяговой характеристики электропривода, лежащей выше изображенной на рис. 2, можно варьировать только параметрами полюсов магнитопровода и параметрами ротора в заданных габаритах.

На рис. 1 позициями обозначены: 1 – постоянные магниты, 2 – магнитопровод статора, 3 – магнитопровод якоря, 4 – обмотка. Силовые характеристики данной МС электропривода в зависимости от угла поворота якоря  $\varphi$  при нормальных условиях (температура  $20^\circ\text{C}$ ) и задание на тяговую характеристику приведены на рис. 2. Материал магнитов – КС25 группа 4а ПОТУ9 (коэрцитивная сила  $H_{C25} = 752000 \text{ A/m}$ , остаточная индукция  $B_{r25} = 1,1 \text{ Тл}$ ) [2].

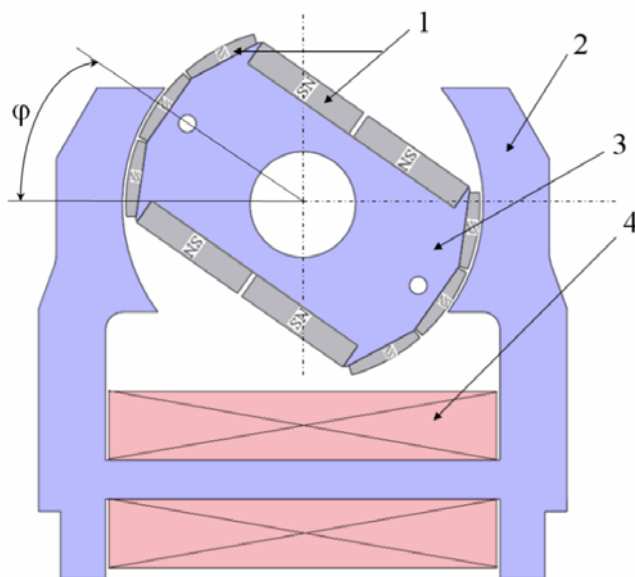


Рис. 1. Магнитная система поляризованного электропривода: 1 – постоянные магниты, 2 – магнитопровод статора, 3 – магнитопровод якоря, 4 – обмотка

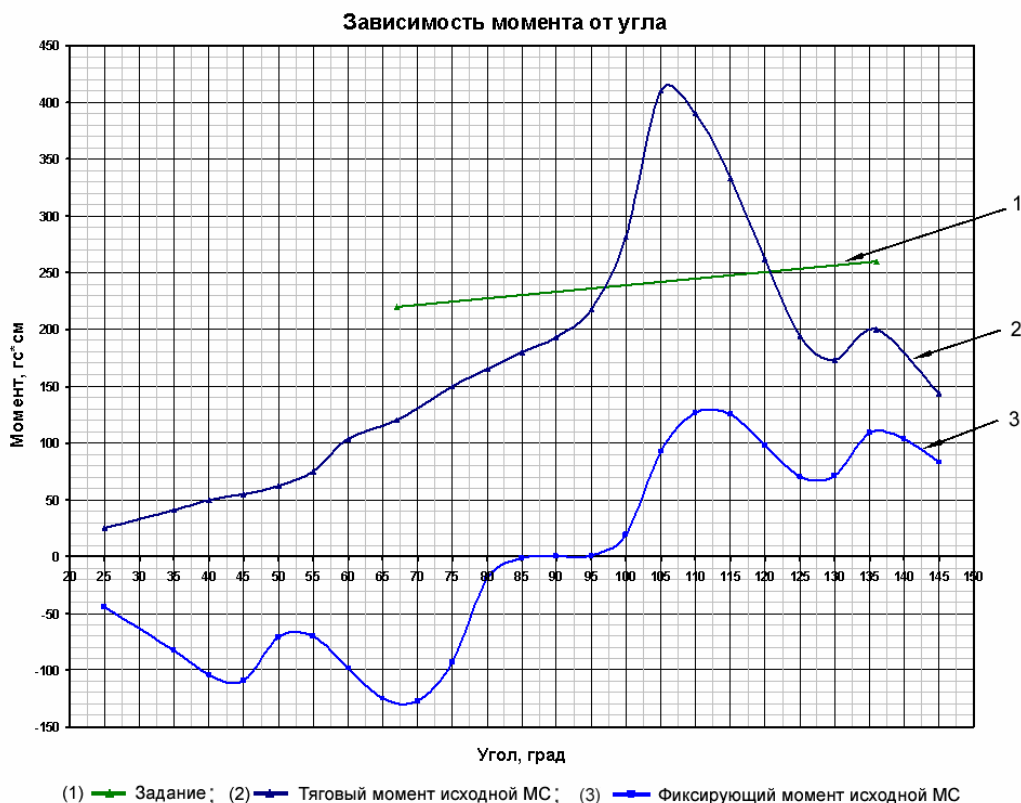


Рис. 2. Силовые характеристики исходной МС электропривода и задание на тяговую характеристику

Материал магнитопроводов статора и якоря – 27КХ с характеристиками согласно [3].

Зависимость сопротивления электрической цепи катушки от температуры  $R(T)$  вычисляется по формуле

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha_R \cdot (T - T_0)], \quad (1)$$

где  $R_0$  – сопротивление при нормальной температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , Ом;  $\alpha_R$  – температурный коэффициент сопротивления,  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $T$  – текущая температура,  $^\circ\text{C}$ .

Значение тока в электрической цепи катушки от температуры  $I(T)$  определяется по закону Ома

$$I(T) = \frac{U}{R(T)}, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение питания электрической цепи обмотки, В.

Параметры, необходимые для расчета:

- угол поворота якоря,  $\varphi = (25..136)^\circ$ ;
- количество катушек в обмотке,  $K = 1$  катушка;
- число витков в каждой катушке обмотки,  $\omega = 650$  витков;
- напряжение питания электрической цепи обмотки,  $U = (18..32)$  В;
- рабочий диапазон температур,  $T = (-40..50)^\circ\text{C}$ ;
- сопротивление электрической цепи катушки при нормальных условиях,  $R(20^\circ\text{C}) = 11$  Ом;
- температурный коэффициент сопротивления,  $\alpha_R = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [4].

## 2. Расчеты

Расчеты проводились в постановке 1 методом последовательного приближения путем варьирования геометрических параметров МС поляризованного электропривода. Для расчетов использовался конечно-элементный пакет.

## 3. Результаты расчетов

В результате расчетов получена МС [5] поляризованного электропривода, которая отвечает постановке 1. МС изображена на рис. 3, где позициями обозначены: 1 – постоянные магниты якоря, 2 – магнитопровод статора, 3 – магнитопровод якоря, 4 – обмотка, 5 – постоянные магниты статора. Скорректированная МС получена из исходной путем добавления в полюса статора постоянных магнитов 5, утолщением полюсных магнитов ротора и уменьшения высоты полюсов статора.

Уменьшение высоты полюсов статора привело к растягиванию тяговой моментной характеристики вдоль рабочего угла вследствие увеличения магнитного сопротивления статора. Снижение тягового момента компенсируется дополнительной поляризацией статора введением в его полюса дополнительных магнитов, намагниченных согласно рисунку 3, и увеличением толщины полюсных магнитов ротора, в результате чего взаимодействие усиленных потоков статора и ротора подняло значение тягового момента на заданный уровень.

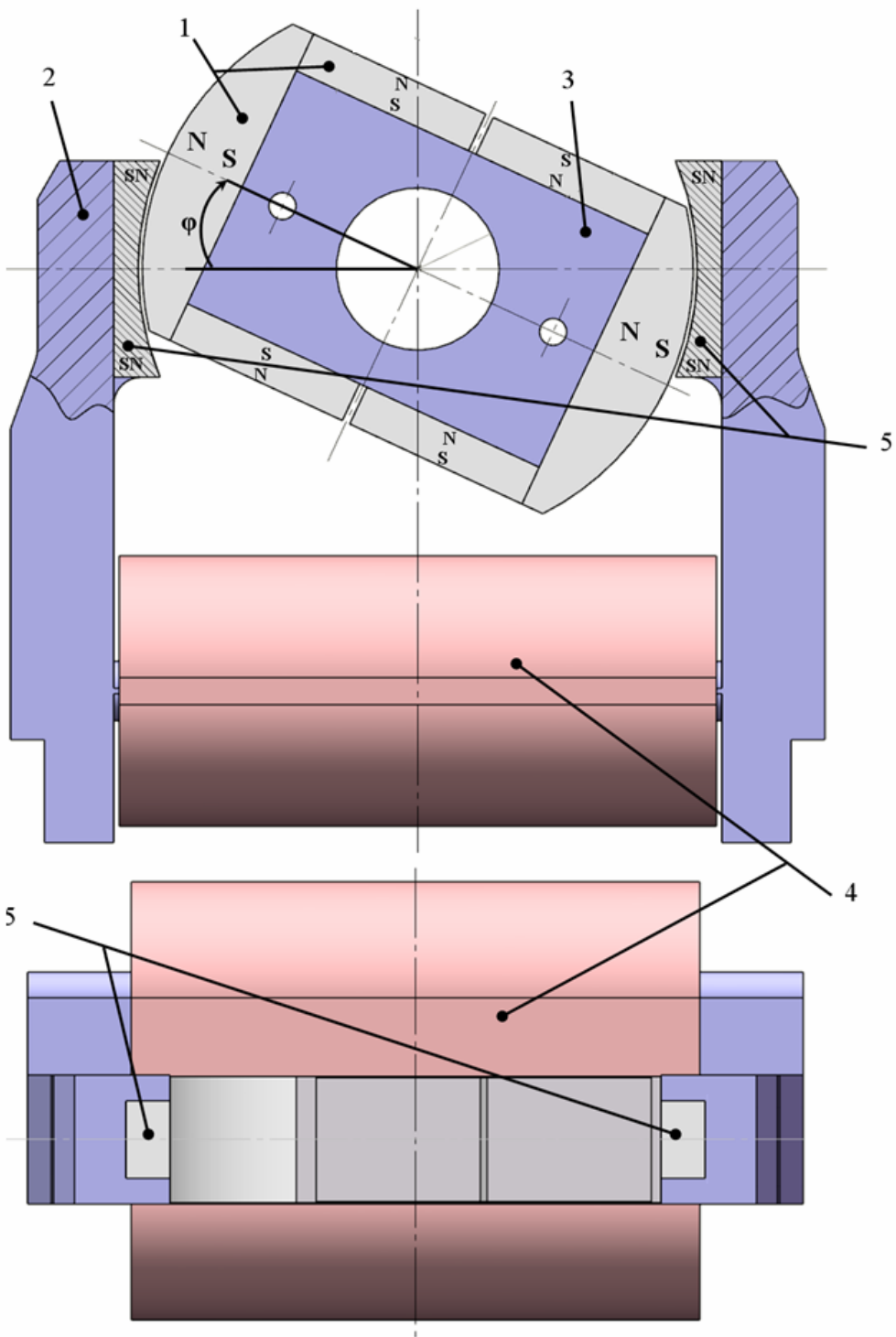


Рис. 3. Скорректированная магнитная система электропривода: 1 – постоянные магниты якоря, 2 – магнитопровод статора, 3 – магнитопровод якоря, 4 – обмотка, 5 – постоянные магниты статора

Силловые характеристики скорректированной МС при работе в нормальных условиях ( $I(20^{\circ}\text{C}) = 1,636 \text{ A}$ )

от одного канала управления (одна обмотки обесточена, напряжение  $U = 18\text{В}$ ) приведены в таблицах 1, 2 и на рис. 4.

Зависимость тягового момента  $M_{\text{тяг}}$  от угла  $\varphi$ 

$\varphi$ , град	25	35	40	45	50	55	60	67	75	80	85	90
$M_{\text{тяг}}$ , гс·см ( $U=18\text{В}$ , $T=20^\circ\text{C}$ )	84	112	138	163	193	217	224	244	271	280	289	293
$\varphi$ , град	95	100	105	110	115	120	125	130	136	145		
$M_{\text{тяг}}$ , гс·см ( $U=18\text{В}$ , $T=20^\circ\text{C}$ )	296	300	307	311	323	450	530	558	563	522		

Таблица 2

Зависимость фиксирующего момента  $M_{\text{фикс}}$  от угла  $\varphi$ 

$\varphi$ , град	25	35	40	45	50	55	60	67	75	80	85	90
$M_{\text{фикс}}$ , гс·см	-158	-167	-155	-139	-117	-93	-70	-13	20	36	48	60
$\varphi$ , град	95	100	105	110	115	120	125	130	136	145		
$M_{\text{фикс}}$ , гс·см	73	87	102	115	136	256	351	405	448	452		

Зависимость момента от угла

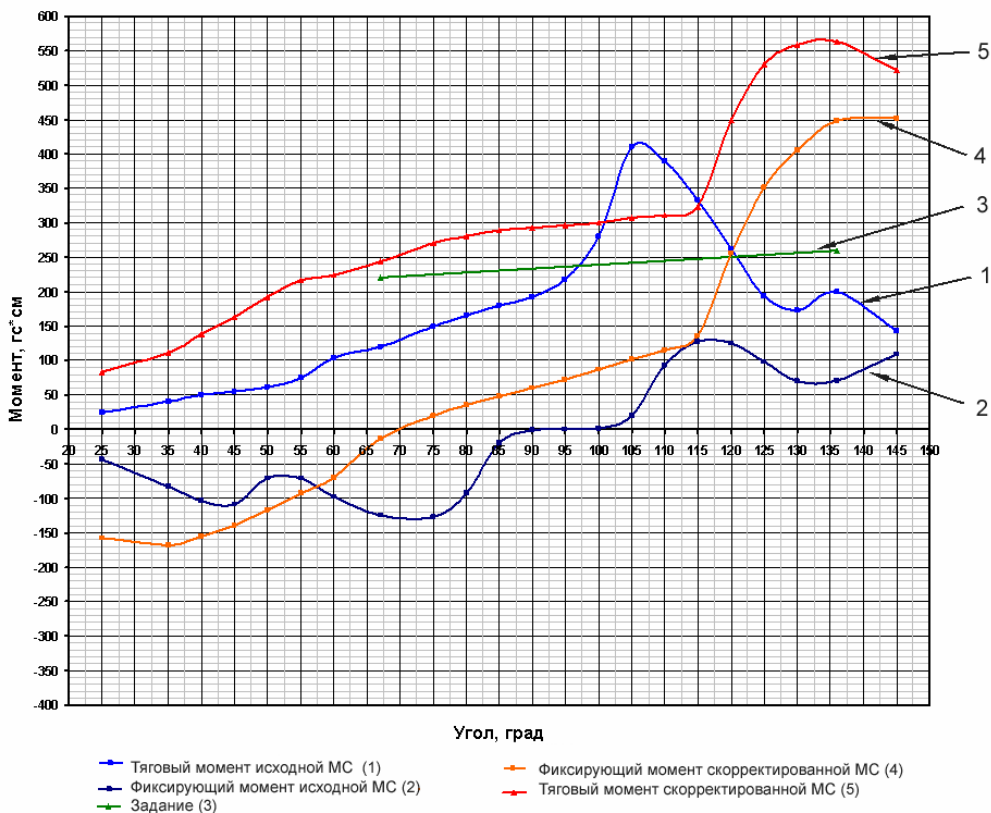


Рис. 4. Силовые характеристики исходной и скорректированной МС электропривода

Из рис. 4, видно, что кривая тягового момента скорректированной МС находится несколько выше прямой из рис. 2. Для подтверждения работоспособности МС поляризованного электропривода в рабочем диапазоне температур  $T = (-40 \dots 50)^\circ\text{C}$  достаточно вычислить всего лишь тяговый момент на уг-

лах  $25^\circ$  и  $67^\circ$  при напряжении питания  $U = 18\text{ В}$  и температуре  $50^\circ\text{C}$ . Значения тягового момента  $M_{\text{тяг}}(25^\circ, 50^\circ\text{C}) = 57\text{ гс} \cdot \text{см}$ ,  $M_{\text{тяг}}(67^\circ, 50^\circ\text{C}) = 232\text{ гс} \cdot \text{см}$ , что свидетельствует о работоспособности поляризованного электропривода во всем диапазоне рабочих температур.

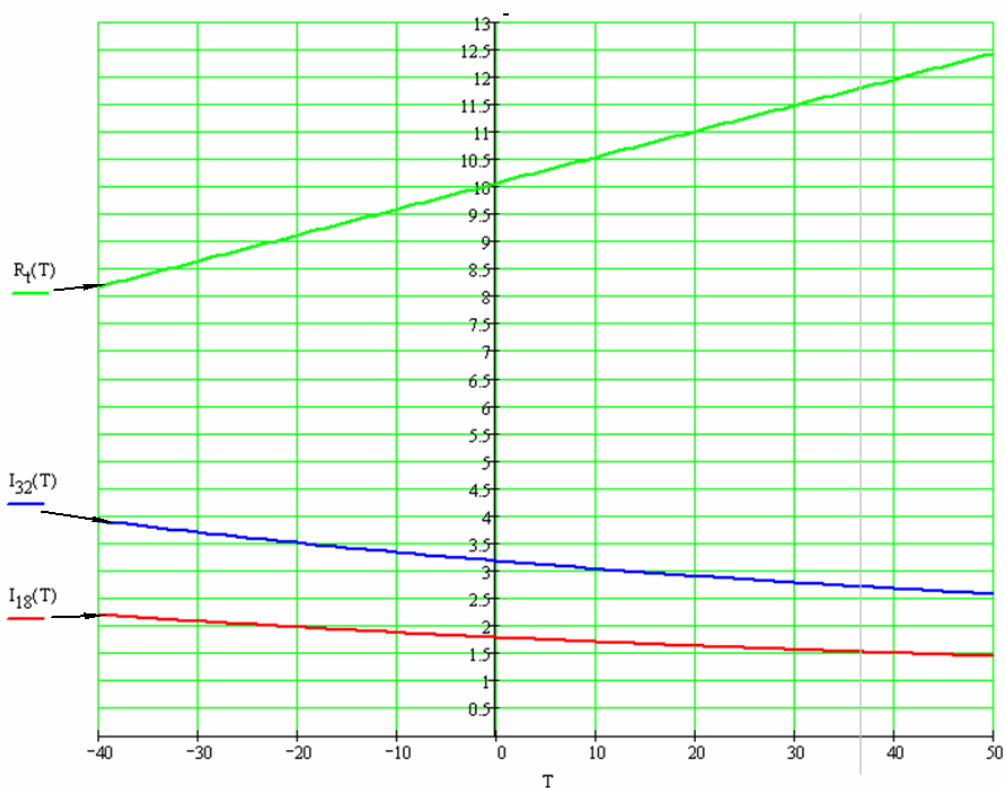


Рис. 5. Зависимости сопротивления и тока от температуры

На рис. 5 изображены зависимости сопротивления и тока от температуры согласно формулам (1) и (2) соответственно.

Из рис. 5 следует, что при питании электрической цепи обмотки напряжением  $U = 32\text{В}$  ток достигает максимального значения 4А при  $(-40)^\circ\text{C}$ .

### Выводы

В результате расчета МС поляризованного электропривода была получена МС в двухканальном исполнении обмоток, тяговая характеристика которой в рабочем диапазоне температур от одного канала, как минимум, на 12 гс·см выше (18 В, 50 °С) требований рис. 2.

### Литература

1. Патент № 2252476 С2. Электродвигатель / С. В. Колесников, В. К. Копров, В. Г. Собянин, С. А. Телков, А. В. Бакулин // Бюл. 2005. № 14.
2. ПОТУ9 инв. № 27 / 12777/
3. Пятин Ю. М. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник. М. Машиностроение, 1982.
4. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого. Л.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3.
5. Патент на полезную модель № 94388. Электродвигатель / С. В. Колесников, В. Г. Собянин, А. А. Клопов // Бюл. 2010. № 14.



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*В. П. Кондуков, В. Л. Патрушев, С. А. Соловьев*

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

## Введение

Исполнительные механизмы (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ) обеспечивают безопасность эксплуатации реакторной установки (РУ) атомной электростанции (АЭС). ИМ СУЗ предназначены для быстрой остановки АЭС при возникновении аварийных ситуаций в самом реакторе, что обуславливает повышенные требования к их надежности и достоверности методов расчетного анализа в обосновании работоспособности на стадии проектирования. В соответствии с поставленной задачей проведено совершенствование методик расчетного анализа в части использования программ, основанных на использовании численных методов, адекватно описывающих исследуемые процессы и позволяющих проводить виртуальный эксперимент.

В данной работе на примере исполнительного механизма аварийной защиты (АЗ) (рис. 1 [1]) показана реализация методики расчетного анализа работоспособности ИМ АЗ.

Оценка работоспособности ИМ АЗ проводится по следующим параметрам:

- времени сброса стержней АЗ при прохождении ими рабочего хода;
- условиям прочности элементов привода от статических нагрузок в соответствии с требованиями норм расчета на прочность ПНАЭ-Г-7-002-86 [2];
- условиям вибростойкости (выполнение отстройки собственных частот от частот детерминированного возбуждения);
- условиям сейсмостойкости (способность исполнительного механизма выполнять свои функции при внешних динамических воздействиях таких как: сейсмические нагрузки, падение самолета, воздействия внешней ударной волны).

Для оценки работоспособности исполнительных механизмов системы управления и защиты используются следующие виды анализа:

а) Кинематический анализ (анализ параметров движения рабочих органов приводов аварийной защиты с учетом вибрационных и сейсмических воздействий, анализ усилий на амортизационные пружины при сбросе стержней-поглотителей в активную зону реактора). Основой для системы уравнений, описывающих динамику системы  $n$  твердых тел, на-

ходящихся под действием  $m_a$  заданных сил и стесненных  $m$  голономными связями, послужили уравнения в форме Эйлера – Лагранжа с множителями

$$\dot{p}_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^{m_a} \bar{F}_j \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{\partial \phi_j}{\partial q_i}, \quad (1)$$

$$p_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0, \quad (2)$$

$$u_i - \dot{q}_i = 0, \quad i = 1, \dots, 6n, \quad (3)$$

$$\phi_j(\{q_\alpha\}, t) = 0, \quad j = 1, m, \quad (4)$$

$$\bar{F}_k - \bar{f}_k(\{q_\alpha\}, \{u_\beta\}, \{\lambda_\gamma\}, t) = 0, \quad k = \bar{1}, \bar{m}_a. \quad (5)$$

Для задания движения твердого тела используются инерциальные глобальные координаты его центра масс и углы Эйлера. По умолчанию ориентация определяется последовательными поворотами вокруг главных центральных осей тела 3-1-3 (для них в интерфейсе и документации пакета используется обозначение В313) на углы  $\psi$  – прецессии,  $\theta$  – нутации,  $\varphi$  – собственного вращения. Выбор одной из 24 систем углов Эйлера должен быть сделан в процессе сборки модели, перед началом симуляции. Как известно из курса теоретической механики необходимость смены системы эйлеровых обобщенных координат связана с вырождением матрицы связи проекций вектора угловой скорости на ортогональные оси и обобщенных скоростей.

б) статический (анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов исполнительного механизма).

в) модальный (анализ собственных частот колебаний)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}, \quad (6)$$

где  $[M]$  – матрица масс системы;  $\{\ddot{u}\}$  – вектор узловых ускорений;  $[K]$  – матрица жесткости;  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений.

г) динамический (расчет НДС при внешних воздействиях, заданных в виде акселерограммы)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (7)$$

где  $[C]$  – матрица демпфирования;  $\{\dot{u}\}$  – вектор узловых скоростей;  $\{F(t)\}$  – функция нагрузки, зависящая от времени.

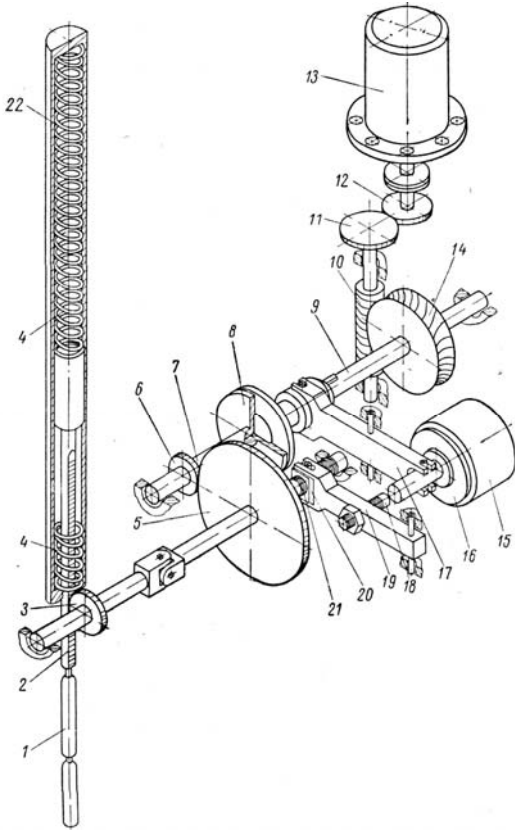


Рис. 1. Принципиальная кинематическая схема исполнительного механизма аварийной защиты [1]

Методика анализа работоспособности исполнительного механизма основана на расчетных методах и программах, разработана с учетом особенностей конструкции и обеспечивает расчетное моделирование параметров движения элементов исполнительного механизма аварийной защиты с определением динамических и инерционных нагрузок, расчет НДС элементов исполнительных механизмов АЗ от действующих нагрузок.

### Кинематический анализ

Кинематический анализ проведен методом динамического анализа [4, 5].

Задача решалась методом динамического анализа на основе теории Лагранжа – Эйлера [3, 4] с использованием расчетного кода. Расчетная модель исполнительного механизма СУЗ приведена на рис. 2. Расчетная модель включает в себя следующие элементы рейки, валы, разгоняющие и амортизационные пружины и элементов контакта пружин и реек. Особенности моделирования являются учет параметров зубчатого зацепления, такие как передаточное число, несоосность валов. Задание необходимых связей в свою очередь влияют на движение элементов кинематики привода. Также важен учет параметров сходимости контакта в зонах контакта пружин и реек.

Результаты расчета параметров движения в пределах заданного рабочего хода элементов исполнительного механизма СУЗ представлены в виде графиков на рис. 3–7 и в табл. 1.

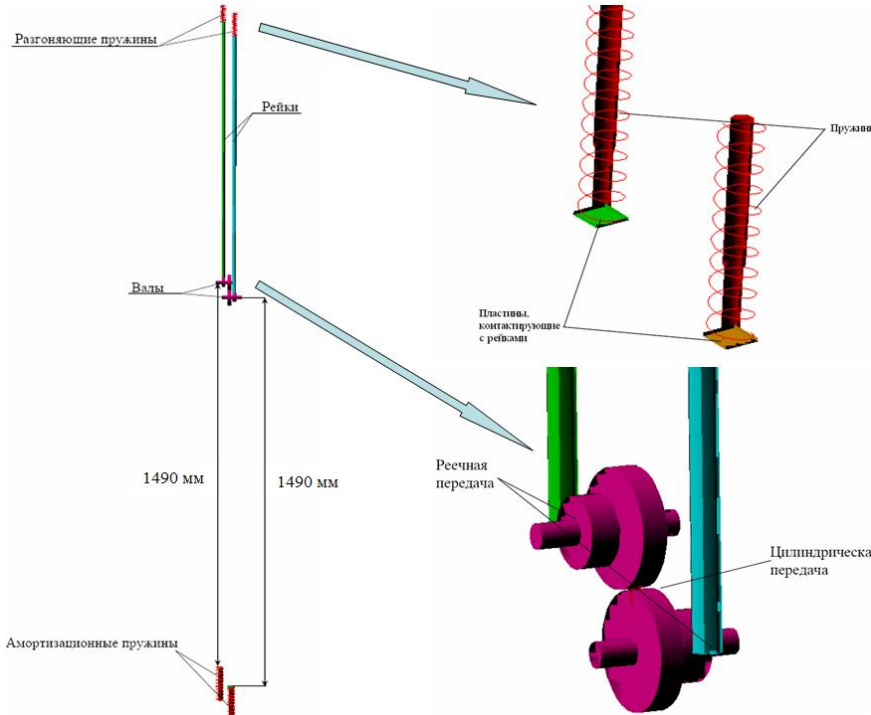


Рис. 2. Расчетная модель исполнительного механизма

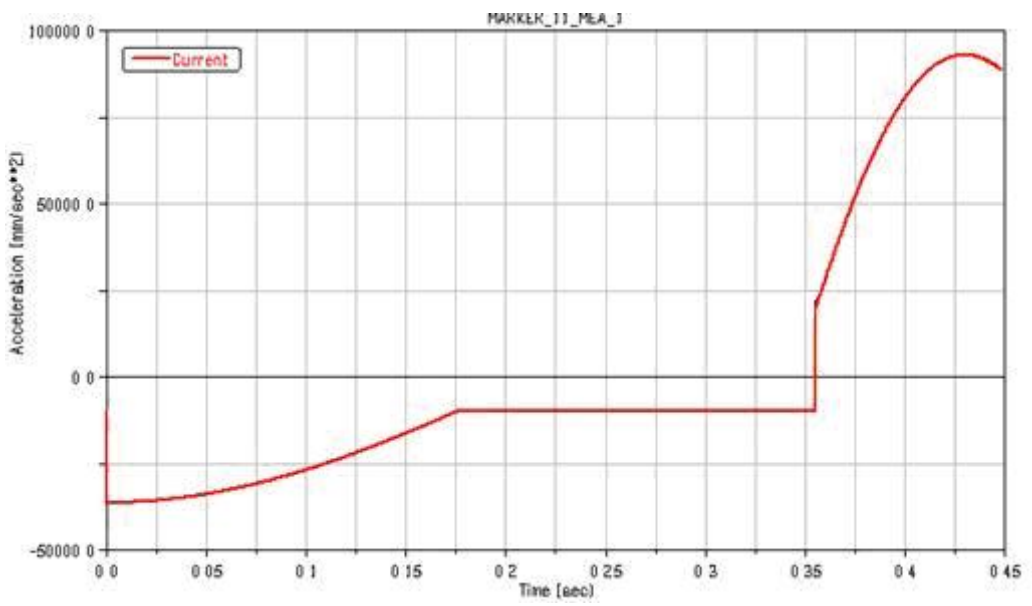


Рис. 3. График изменения ускорения рейки в зависимости от времени

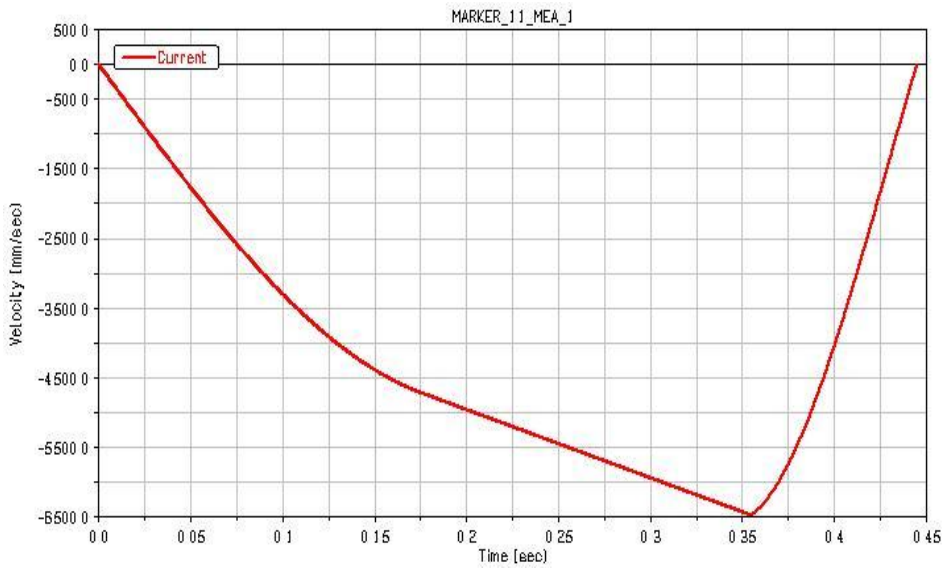


Рис. 4. График изменения скорости рейки с течением времени

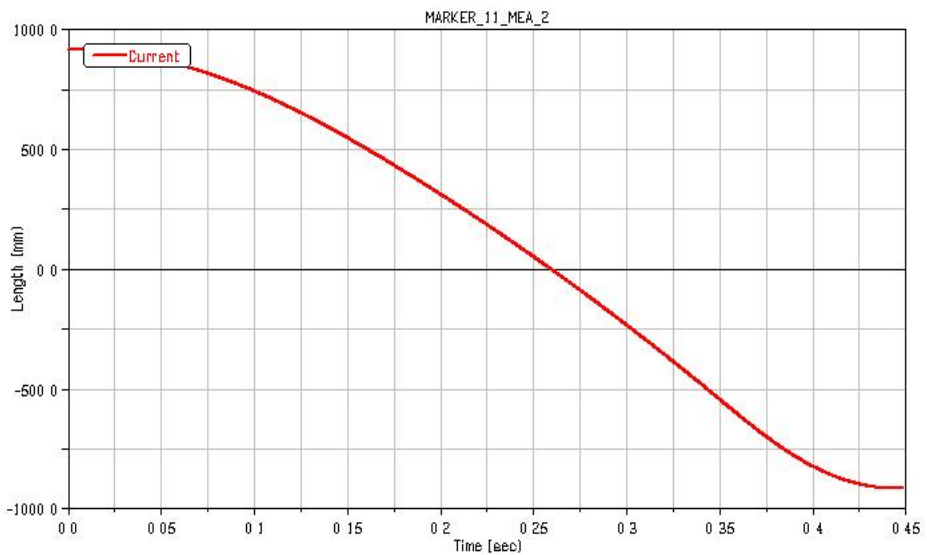


Рис. 5. График перемещения рейки в зависимости от времени

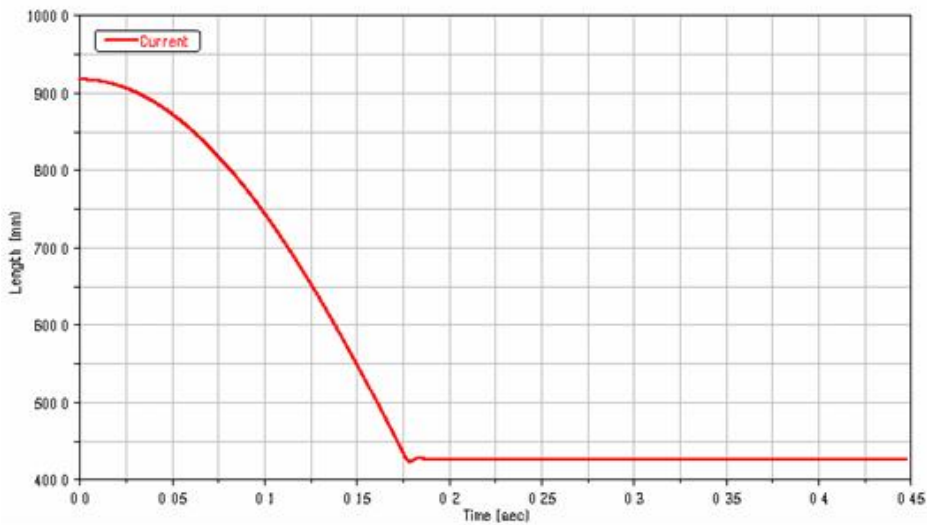


Рис. 6. График изменения положения вершины разгоняющей пружины в зависимости от времени

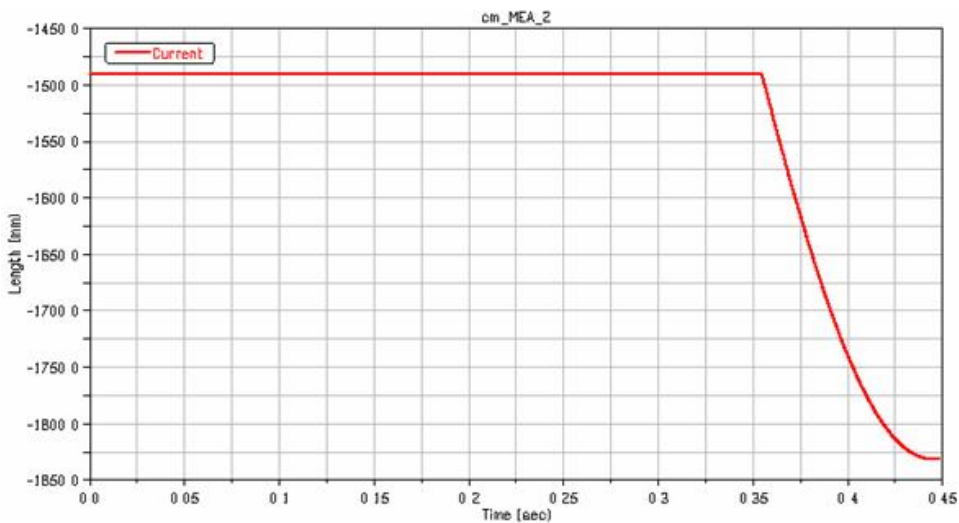


Рис. 7. График изменения положения вершины амортизационной пружины в зависимости от времени

Таблица 1

Результаты расчета

Параметр	Результат
Скорость рейки при разгоне	472,5 см/с
Время свободного полета рейки	0,182 с
Скорость рейки при свободном полете	647 см/с
Время торможения	0,096 с
Время сброса на назначенном ходе	0,373 с
Время полного сброса	0,448 с

В результате исследований показано, что метод динамического анализа позволяет значительно сократить время расчетов при оптимизации параметров элементов конструкции, определить параметры движения сложных систем, а также учесть вибрационные и сейсмические воздействия на исполнительный механизм, значительно возросла наглядность представления результатов.

**Анализ прочности**

Анализ статической прочности при использовании современных программных кодов позволяет определить напряженно-деформированное состояние от действующих нагрузок с учетом концентрации и особенностей геометрии конструкции.

Методология расчетного моделирования НДС элементов кинематики исполнительного механизма АЗ включает в себя следующие задачи:

- расчет на прочность валов;
- расчет на прочность зубчатых передач;
- расчет подшипников на статическую прочность и долговечность;
- расчет на прочность пружин.

Для решения поставленных задач используется метод конечного элемента [5].

Для решения поставленных задач используется следующий алгоритм:

- разработка расчетных моделей;
- моделирование нагружения и проведение расчетного анализа;
- анализ работоспособности по условиям прочности.

Анализ прочности валов проводится по типовым схемам (рис. 8). Действующие напряжения оцениваются по категориям напряжений [2].

Определение НДС взаимодействия зубьев проводится методом конечных элементов с решением контактной задачи (рис. 9). Результаты расчета представлены на рис. 10.

Результаты расчета НДС элементов зубчатого зацепления (рис. 11).

Получено поле распределения напряжений. По сечению А-А (в корне зуба) произведена линейризация напряжений и построен график распределения напряжений по сечению по категориям (в соответствии с [2]). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета

Напряжения	Результат
Изгибные (при $M_{max}$ )	52,8 МПа
Контактные (при $M_{ном}$ )	348 МПа

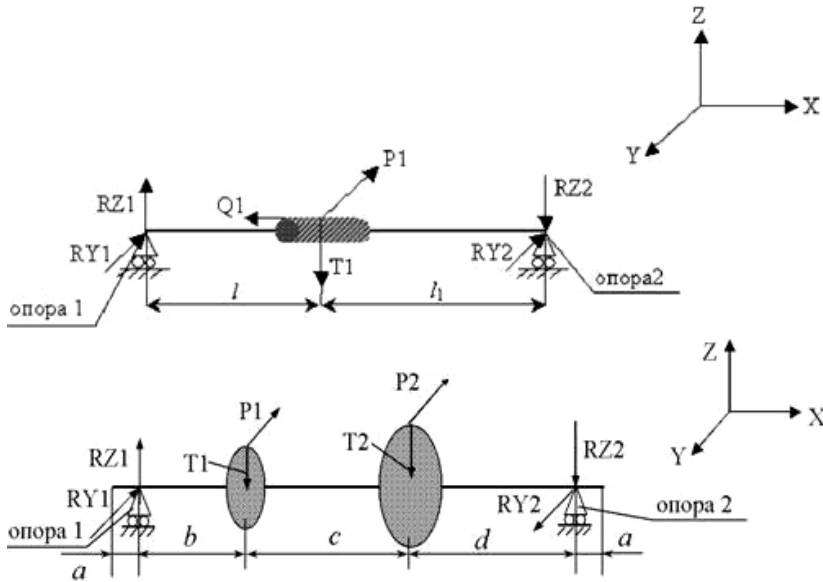


Рис. 8. Расчетные схемы валов

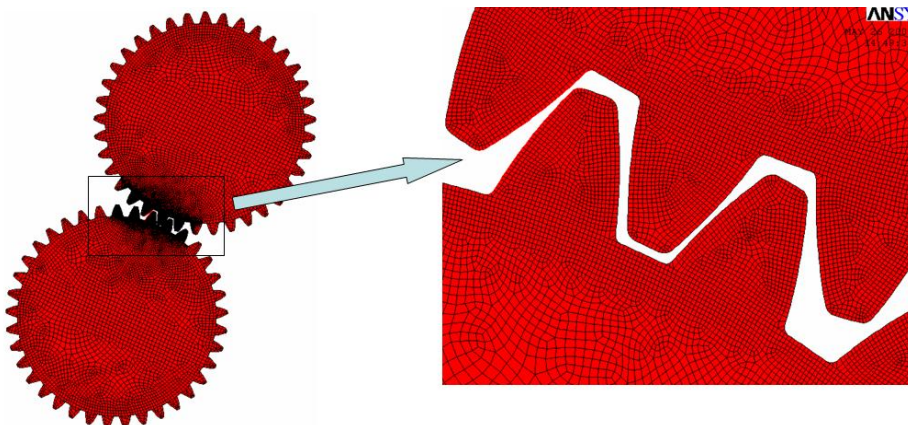


Рис. 9. Расчетная модель зубчатого зацепления



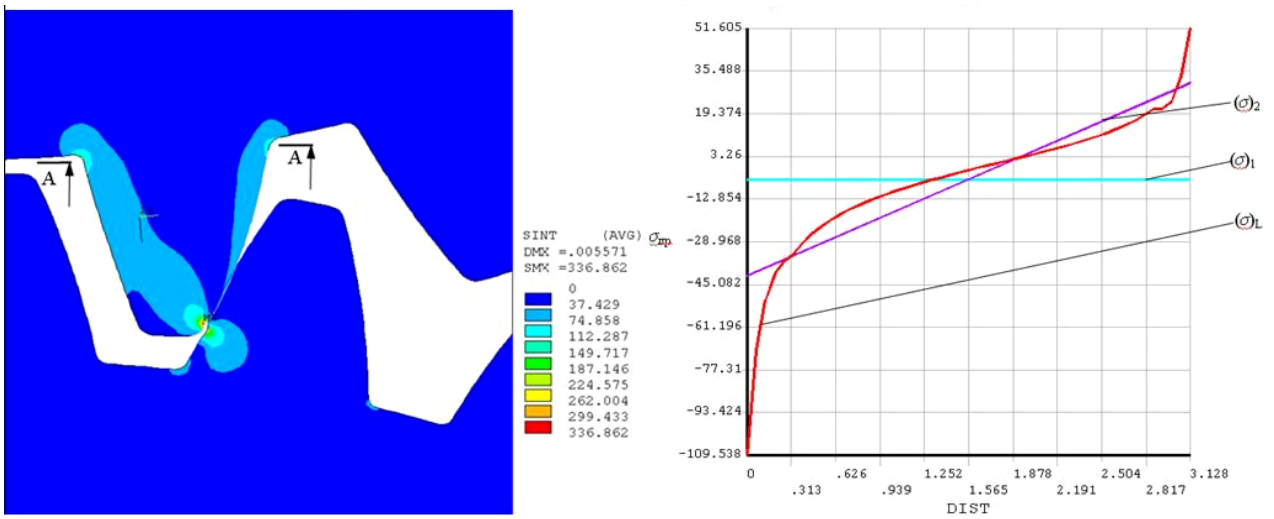


Рис. 10. Результаты расчета

### Анализ вибропрочности и сейсмостойкости

Анализ вибропрочности при использовании современных компьютерных программ позволяет определить собственные частоты колебаний как отдельного исполнительного механизма, так и всей компоновки в целом с учетом геометрических особенностей конструкции. Расчетная 3-D модель типовой конструкции комплекта исполнительных механизмов СУЗ показана на рис. 11.

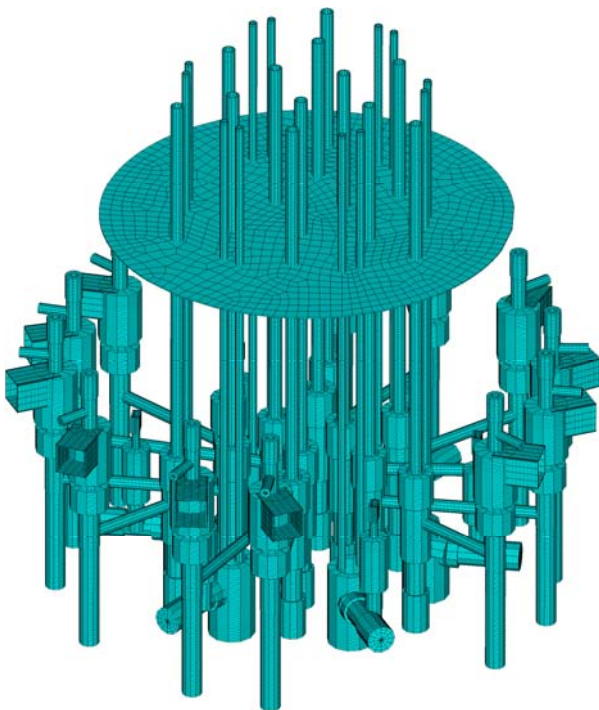


Рис. 11. Расчетная конечно-элементная модель компоновки приводов

На основе этой модели проводится анализ сейсмостойкости конструкции.

### Заключение

Перспективой развития данной работы является расчет компонок исполнительных механизмов СУЗ на сейсмостойкость с использованием метода динамического анализа [3, 4] и передача результатов вычисления в МКЭ пакеты [5] для последующих детальных расчетов. В дальнейшем для автоматизации решения задачи расчета нагрузок и передачи их в программах использующих МКЭ планируется использовать возможности взаимодействия пакетов.

### Литература

1. Емельянов И. Я. Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов / В. В. Воскобойников, Б. А. Масленок. М.: Атомиздат, 1978.
2. ПНАЭ-Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов Ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. MSC Software. Виртуальная разработка изделий – технология XXI века.
4. MSC Software. Комплексные технологии виртуального моделирования и инженерного анализа.
5. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя. ДМК Пресс, 2005.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*А. И. Котик, Г. Г. Гаврилов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одна из задач при конструировании электронных устройств – это повышение надежности элементов при одновременном снижении их материалоемкости. Условием эффективного решения этой задачи является использование математического моделирования и анализа во взаимосвязи с опытом и новейшими конструктивными и технологическими разработками.

Опыт проектирования показывает, что конструктор должен обладать обширными современными знаниями в различных областях науки и техники. Обеспечение надежности в процессе разработки устройств достигается использованием различных конструкторских и технологических методов: выбором материала и метода его упрочнения, проведения расчета допусков и размерных цепей, проведения моделирования, проведения расчетов прочности и жесткости, определения форм потери устойчивости и т. д.

Уровень развития программного обеспечения и электронной вычислительной техники позволяет уйти от традиционных, ручных методов конструирования и последующего расчета конструкций к новым информационным технологиям с использованием ЭВМ. На ЭВМ могут быть спроектированы новые детали и изделия в целом, путем моделирования конструктором требуемых параметров деталей и механизмов. Конфигурация и размеры деталей могут изменяться на любом этапе проектирования, обеспечи-

вая многовариантность создаваемой конструкций. На основе созданных трехмерных геометрических моделей проектируемых изделий возможно применение компьютерных методов решения различных задач прочности и жесткости, что обеспечивает переход на более высокий уровень конструирования, и как результат получается лучшая, более надежная конструкция изделий.

Рассмотрим вопрос применения САПР и автоматизированных расчетных систем на некоторых наглядных примерах трехмерных цифровых моделей (далее модели) реально проектируемых изделий СВЧ, таких как модель антенны СВЧ, модель замедляющей структуры, модель резонатора, модель коллектора. Методология моделирования на ЭВМ следующая:

- создание адекватной модели детали или сборки;
- определение и задание кинематических граничных условий, исключающих движение тела как жесткого целого в бесконечность;
- определение и присвоение статических граничных условий, наличие внешних нагрузений (усилия, давления, вращающий момент, температура и т. д.), и необходимых коэффициентов. При этом заданная совокупность условий должна обеспечить деформированное состояние тела;
- разбиение модели на корректную конечно-элементную дискретизацию;

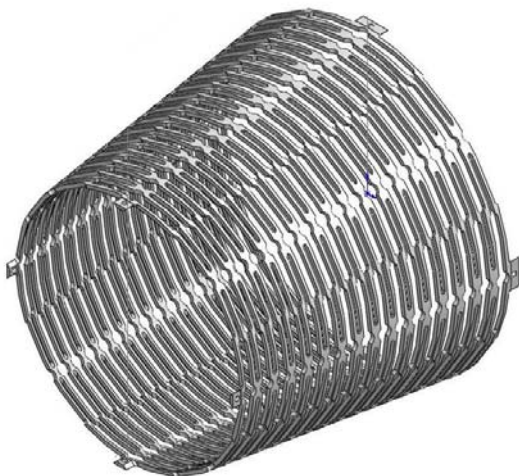


Рис. 1. Модель СВЧ антенны

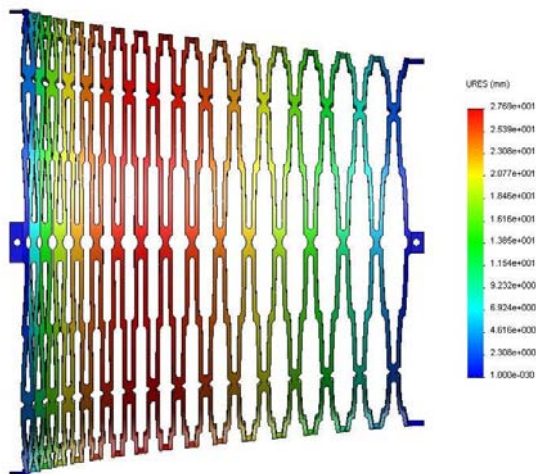


Рис. 2. Деформированное состояние



– проведение расчета, выведение результатов и их интерпретация и анализ полученной информации.

Модель антенны СВЧ показана на рис. 1 и представляет собой усеченный полый конус с пазами, расположенными под углом  $45^\circ$ . Для примера возьмем моделирование осевого нагружения ускорением  $30 g$ .

Задача моделирования – определить максимальные напряжения и перемещения в центральном сечении модели антенны СВЧ. Материал антенны – медь. Результаты проведенного моделирования и аналитического расчета представлены в табл. 1 и рис. 2. Результаты аналитического расчета и моделирования на ЭВМ практически одинаковы (нет большого расхождения в данных) и показывают, что модель антенны СВЧ не работоспособна по осевому виду нагружения. Происходит смыкание витков антенны у основания и недопустимое растяжение у вершины.

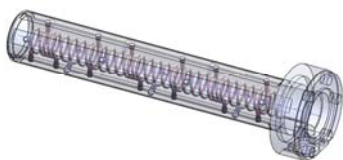


Рис. 3. Модель замедляющей структуры

Модель замедляющей структуры показана на рис. 3. Это – медная спираль, помещенная коаксиально в цилиндрический корпус из нержавеющей стали, спираль поддерживают керамические втулки.

Задача моделирования – определить контактное напряжение в паре спираль и втулка, при осевом нагружении ускорением  $30 g$ . Результаты расчета представлены в табл. 2. Теоретическое справочное значение контактного напряжения лежит в пределах от  $12\text{--}25$  МПа, а перемещения спирали по втулке от положения равновесия может составить до  $0,2$  мм и это не изменит работоспособности замедляющей структуры по электродинамическим параметрам. Результаты расчета позволяют сделать вывод, что модель замедляющей структуры вполне работоспособна и надежна по этому конкретному виду нагружения.

Модель резонатора представляет собой тонкий цилиндр с отверстием в центре и пазом над ним.

Задача моделирования – выяснить наиболее нагруженные зоны резонатора при осевом нагружении ускорением до  $30 g$ . Более напряженное состояние в материале резонатора наблюдается на правом и левом краях паза, что не является критичным местом для резонатора. Эпюра напряженного состояния представлена на рис. 4. Максимальное напряжение в резонаторе, смоделированное на ЭВМ, равно  $0,59$  МПа. Аналитический расчет резонатора не проводился.

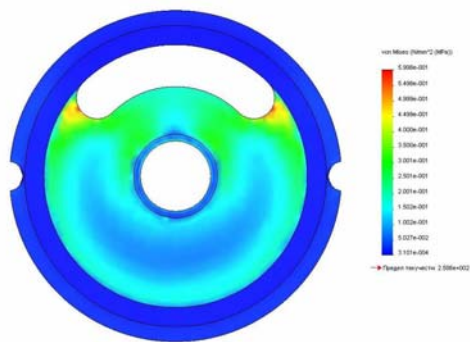


Рис. 4. Эпюра напряженного состояния резонатора

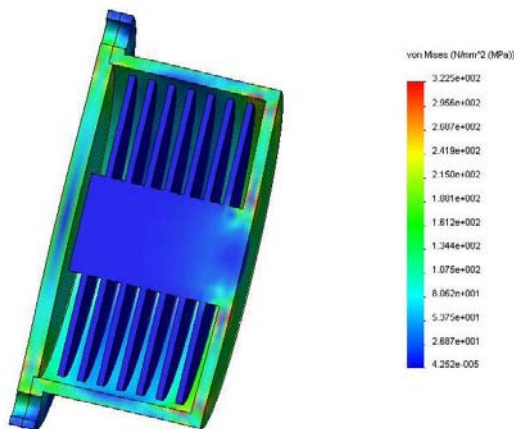


Рис. 5. Эпюра напряженного состояния коллектора

Модель коллектора представляет из себя бак высокого давления ( $30 \text{ кг/см}^2$ ) выполненный в виде глухого цилиндра из нержавеющей стали, закрытого крышкой из нержавеющей стали, прикрепленной к нему с помощью болтового соединения.

Задача моделирования – выяснить наиболее нагруженные места, проверить, достаточно ли для крепления крышки восьми болтов М8. Более напряженное состояние коллектора наблюдается в углах с глухой стороны цилиндра. Результаты расчета коллектора представлены в табл. 3 и рис. 5. Результаты расчета болтового соединения на растяжение представлены в табл. 3. Данные аналитического расчета и моделирования на ЭВМ не имеют глобальных расхождений, поэтому можно сделать вывод, что модель коллектора вполне работоспособна и надежна для конкретного нагружения.

Анализ полученных расчетных данных (теоретических и цифровых) показывает, что глобального расхождения в результатах нет, а имеющиеся расхождения – это объективные расхождения, которые невозможно устранить из-за методологических и системных упрощений и допущений. То есть точность, которую обеспечивает автоматизированная система инженерных расчетов, вполне приемлема для этапа проектирования изделий СВЧ. Точность же аналитических методов расчета тоже достаточна, но

Расчетные данные модели антенны

Данные	Напряжение	Перемещение
Аналитический расчет	294,3 МПа	21,6 мм
Моделирование на ЭВМ	244,7 МПа	15,2 мм

Таблица 2

Расчетные данные модели замедляющей структуры

Данные	Контактное напряжение	Перемещение витка по втулке от положения равновесия
Аналитический расчет	16,2 МПа	0,68 мм
Моделирование на ЭВМ	24,8 МПа	0,93 мм

Таблица 3

Расчетные данные модели коллектора

Данные	Максимальное напряжение в коллекторе	Расчетная нагрузка на болт	Напряжение в болте М8
Аналитический расчет	260,4 МПа	6712 Н	119 МПа
Моделирование на ЭВМ	322,5 МПа	5736,5 Н	206 МПа

они занимают гораздо больше времени. Основные достоинства современных систем проектирования и последующего расчета следующие:

- гибкость моделирования позволяет проектировать и анализировать изделия различной сложности;
- возможность определения связей деталей в изделии и непосредственно в конструктиве самой детали;
- наглядность нагружения позволяет изучить работу детали или изделия в целом при различных нагружениях;
- программное обеспечение позволяет выполнить статический и динамический анализ с получением значений перемещений, деформации, механических напряжений;
- расчет размерных цепей на любом этапе анализа обеспечивает оценку изделия из условия целостности конструкции;
- оценка прочности конструкции, отдельных ее узлов и деталей позволяет выявить недостатки конструкции;
- более наглядное представление конструкции, как следствие более быстрый выпуск конструкторской документации без системных ошибок;
- более точный расчет необходимого количества материалов, которые требуются для изготовления;
- существенное сокращение временных затрат на проектирование.

Следует отметить так же следующие недостатки систем проектирования и последующего расчета:

- неоднозначность заложенного математического аппарата для получения матриц жесткости конечных элементов, приведенных нагрузок, приложенных к поверхностям или объему элемента к усилиям в узлах, а также решения обратных задач: вычисле-

ния полей деформации и напряжений в объеме элемента на базе перемещений в узлах. То есть конкретные реализации могут существенно отличаться от стандартных схем;

- отсутствие адекватных баз данных со свойствами материалов. Очень скудный набор баз данных с геометрическими моделями стандартизованных изделий;

– заложенный математический аппарат и алгоритм получения матрицы жесткости конечного элемента, требует уплотнение сетки в зонах значительных нагрузок или же около мест приложения граничных условий;

– конечно-элементная дискретизация является уникальной для каждой модели, что влечет за собой невозможность написания общей методики разбиения на конечные элементы, возможно лишь дать рекомендации, а также перенос сетки из одного программного средства в другое;

– геометрическая модель, как правило, существенно упрощается для проведения расчетных процедур. То же можно сказать и об используемых граничных условиях и нагрузках. В результате точность проводимых расчетов падает;

– матрица жесткости конечного элемента малой геометрической формы, например фаски, не является адекватной (слишком жесткий элемент) т.е. расчет малых форм производится некорректно;

– при расчете моделей с деталями из различных материалов возникает неоднозначность постановки задач и различных условий (например, матрица жесткости неадекватна);

– невозможность написания общей методики проведения расчета в общем плане. Возможно лишь написание методики только для конкретной модели или класса моделей с одинаковой формой, но разных

конкретных и ограниченных типоразмеров. В общем случае можно только дать рекомендации по моделированию и дальнейшему расчету;

– постоянная работа с автоматизированными системами проектирования и расчета требует постоянного обновления программных средств и аппаратного оборудования.

Из выше изложенного следует вывод, что многогранность применения систем автоматизированного проектирования и систем инженерных расчетов, несмотря на недостатки таких систем, однозначно повышает надежность разрабатываемых изделий СВЧ. Применение современных систем инженерных расчетов обеспечивает требуемую точность результатов, также снижает затраты на проектирование, с одновременным повышением качества разрабатываемых изделий. Но в тоже время не стоит «увлекаться» автоматизированным проектированием, нельзя пренебрегать предшествующим опытом конструирования, теоретическими данными и расчетами и экономить на проведении соответствующих экспериментов и опытах. Никогда нельзя исключать творческий поиск, даже имея в своем распоряжении са-

мую современную систему автоматизированного проектирования и инженерного расчета. Основной целью применения любых автоматизированных систем должно являться лишь снижение материальных, физических, психологических и других затрат на рутинную часть работы конструктора. Не следует всецело полагаться на данные цифрового моделирования. Создать надежную и работоспособную конструкцию возможно, лишь используя все конструкторские и технологические методики.

## Литература

1. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление Материалов. М.: Высшая школа, 1989.
2. Чуков А. Н. Техника 21 века. Т.: Шар, 2001.
3. Алямовский А. А. Компьютерное моделирование в инженерной практике. С.-Пб.: БХВ - Петербург, 2006.
4. Краузе В. Конструирование приборов. М.: Машиностроение, 1987.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И УСЛОВИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

И. М. Крылов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В повседневной практике определение механических свойств материала, из которого в последующем будет изготовлена деталь, происходит следующим образом: во время отливки заготовки, из той же плавки отливается образец-свидетель, по которому в последствии определяют механические свойства. Как правило, образец-свидетель имеет классическую цилиндрическую форму с захватами. Технология изготовления его часто отличается от технологии изготовления самой детали, поэтому механические свойства материала образца не во всех случаях являются идентичными свойствам материала детали. Наиболее достоверную информацию о механических свойствах материала детали можно получить только при испытании самой детали или же образца стандартных размеров и формы, вырезанного из детали.

Сферическая форма детали является весьма распространенной во многих областях промышленности. Как правило, такие детали характеризуются малой толщиной стенки, что не дает возможности вырезания образцов стандартной формы. Таким образом, экспериментальное определение механических свойств материала тонкостенных оболочек сферической формы является весьма трудной задачей.

Для решения этой задачи в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан и проходит экспериментальную проверку метод, позволяющий исследовать механические свойства материала непосредственно на деталях сферической формы при нагружении их гидростатическим давлением. Принципиальная схема испытания приведена на рис. 1.

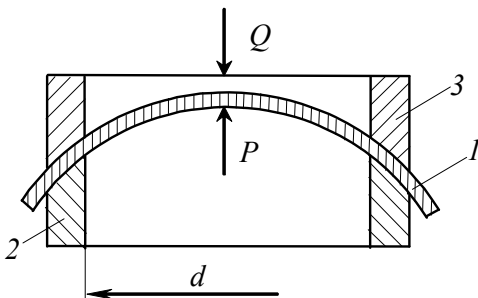


Рис. 1. Принципиальная схема испытания оболочек

Оболочка 1 устанавливается на опорное кольцо цилиндра 2 и прижимается к нему посредством при-

жимного кольца 3. Торцы опорного и прижимного колец имеют сферическую форму с радиусами соответствующими внутренней и наружной поверхностей оболочки.

В полости цилиндра при испытании оболочки создается гидравлическое давление  $p$ . Под действием давления происходит выдавливание оболочки через круглое окно с диаметром  $d$  (рис. 1). В этом случае направление главных осей напряженно-деформированного состояния материала оболочки в центральной зоне окна выпучивания следующее: одна ось является радиальной и проходит через центр оболочки, а две другие – тангенциальными и направлены перпендикулярно к радиальной оси. При таком нагружении в зоне близкой к центру окна выпучивания в направлении радиальной оси действует нагрузка в виде гидравлического давления, а по двум другим осям действуют одинаковые растягивающие силы. Величина тангенциальных растягивающих компонент рассчитывается по формуле:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{2t}, \quad (1)$$

где  $p$  – величина гидравлического давления,  $R$  – радиус оболочки.

Таким образом, радиальная компонента напряжения будет намного меньше двух других компонент. Тогда для этого случая соотношения между главными напряжениями имеют вид:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \gg \sigma_3.$$

Необходимое усилие прижима оболочки обеспечивается с помощью гидропривода. Применение его оправдано потому, что он уже используется для выдавливания оболочки. Возможны различные варианты конструкции гидравлического прижима. Поэтому вначале произведем расчет усилий, действующих на оболочку в месте прижима.

Для расчета гидравлического давления и усилия прижима допустим, что:

- оболочка является тонкостенной;
- коэффициенты трения оболочки относительно цилиндра и прижимного кольца одинаковы.

Учитывая, что оболочка осесимметрична, расчетную схему можно представить следующим образом:

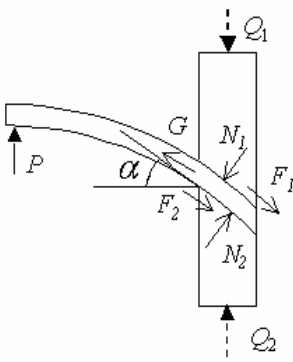


Рис. 2. Схема сил, действующих на оболочку в процессе ее испытания

При гидравлическом давлении  $p$  на фрагмент оболочки в окне выдавливания по его оси действует суммарное усилие

$$P = p \cdot F_0, \quad (2)$$

где  $F_0$  – площадь окна выпучивания.

Так как испытанию подлежат тонкостенные оболочки, пренебрежем действием изгибающих моментов. Для упрощения расчетов усилия прижатия можно рассматривать оболочку в месте защемления как гибкую связь, в которой усилие реакции направлено по касательной к оболочке (рис. 2). Такое упрощение приводит к некоторому запасу надежности закрепления. При этом интегральное (по всему периметру) усилие реакции, в соответствии с рис. 2, составит:

$$G \approx \frac{P}{\sin \alpha}, \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{d}{2R}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол защемления по краю окна выпучивания. В результате совместного действия суммарной выдавливающей силы  $P$  и силы прижима  $Q_1$  в месте защемления оболочки возникают распределенные по периметру нормальные силы реакции  $N_1$  и  $N_2$ , а также препятствующие вытяжке оболочки силы трения  $F_1 = N_1 \cdot f_{mp}$  и  $F_2 = N_2 \cdot f_{mp}$  (рассмотрим случай, когда коэффициенты трения оболочки относительно цилиндра и прижимного кольца одинаковы).

Для нахождения силы  $Q_1$ , достаточной для удержания заготовки от вытяжки, составим одно уравнение равновесия сил. Учитывая, что оболочка рассматривается как гибкая связь, не воспринимающая поперечных сил, безусловно, имеет место  $N_1 = N_2 = N$ .

Сумма проекций на вертикальную ось сил, действующих на прижимное кольцо (рис. 3):

$$Q_1 - N_1 \cdot \cos \alpha - N_1 \cdot f_{mp} \sin \alpha = 0 \quad \text{или, с учетом } N_1 = N$$

$$Q_1 - N(\cos \alpha + f_{mp} \sin \alpha) = 0. \quad (5)$$

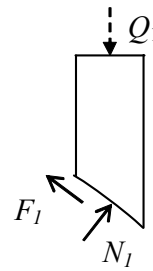


Рис. 3. Сумма проекций на вертикальную ось сил, действующих на прижимное кольцо

Сумма проекций на вертикальную ось сил, действующих на оболочку (рис. 2):

$$P - N_1 \cdot \cos \alpha - N_1 \cdot f_{mp} \sin \alpha +$$

$$+ N_2 \cdot \cos \alpha - N_2 \cdot f_{mp} \sin \alpha = 0$$

$$P - 2Nf_{mp} \sin \alpha = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) преобразуем в выражение для определения  $N$

$$N = \frac{P}{2f_{mp} \sin \alpha}. \quad (7)$$

Подставив полученное выражение в формулу (5), найдем выражение для определения  $Q_1$ :

$$Q_1 = \frac{P}{2} \left[ \frac{\text{ctg} \alpha}{f_{mp}} + 1 \right],$$

или

$$Q_1 = \frac{\sigma \cdot t \cdot F_0}{R} \left[ \frac{\text{ctg} \alpha}{f_{mp}} + 1 \right]. \quad (8)$$

Реакция опорного (нижнего) кольца  $Q_2$  равна:

$$Q_2 = N_2 \cdot \cos \alpha - N_2 \cdot f_{mp} \sin \alpha$$

$$Q_2 = \frac{P}{2} \left[ \frac{\text{ctg} \alpha}{f_{mp}} - 1 \right]. \quad (9)$$

Используя (8) и (9), имеем  $Q_1 - Q_2 = P$ .

Произведем оценку величины усилия прижима для модельной оболочки, изготовленной из сплава АМц. Предположим, что оболочка будет нагружена до разрушения, т. е. в ней будет достигнут предел прочности, равный для сплава  $\sigma_b = 150$  МПа. Диаметр окна выдавливания  $d = 80$  мм. Примем значение коэффициента трения  $f_{mp} = 0,2$ . Зная размеры оболочки по формуле (8) можем найти  $Q_1$ . В данном случае  $Q_1 \approx 220$  кН.

Таким образом, можно использовать автономное прижимное устройство, давление в котором обеспечивается собственным гидроприводом. Но его применение существенно усложняет конструкцию и эксплуатацию испытательной установки. Поэтому предпочтительнее прижимное устройство, в котором прижим и нагружение оболочки обеспечивается гидравлическим давлением, создаваемым одним устройством. Гидропривод такого устройства значительно

проще, так как он является общим для прижима и для выдавливания оболочки, кроме того, при его использовании с ростом давления и усилия выдавливания увеличивается и усилие прижатия, повышая надежность закрепления оболочки. Гидравлический прижим объединен с камерой выдавливания в компактный единый узел (рис. 4).

При совмещенном гидроприводе необходимое усилие прижима обеспечивается подбором только одного параметра – площади рабочего гидроцилиндра. С использованием формулы (8) получим выражение для определения диаметра гидроцилиндра прижима:

$$D_{ц} = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi \cdot p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \left[ \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{f_{mp}} + 1 \right]}{\pi}} = d \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{f_{mp}} + 1 \right)}. \quad (10)$$

Нетрудно подсчитать, что для принятых размеров окна выдавливания и радиуса оболочки  $D_{ц} \approx 2d$  независимо от ее толщины и механических свойств. При этом не имеет значения, выполнен ли поршень сплошным или кольцевым, как изображено на рис. 4.

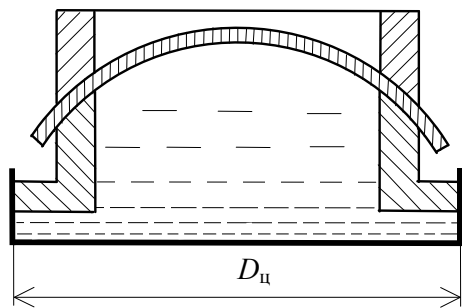


Рис. 4. Схема прижимного устройства

Учитывая, что в системе прижима должен быть предусмотрен предварительный механический поджим, а также то, что при высоких контактных давлениях вероятны более высокие значения коэффициента трения, чем 0,2, прижим оболочки будет обеспечиваться с некоторым запасом. Вместе с тем, по запасу усилия прижима существует конструктивное ограничение, связанное с допускаемыми контактными давлениями на оболочку. Для предотвращения существенных деформаций оболочки ограничим средние контактные давления величиной  $0,8 \sigma_T$ :

$$\sigma_k \approx \frac{4Q_1}{\pi(D^2 - d^2)} \leq 0,8\sigma_T, \quad (11)$$

где  $D$  – внешний диаметр опорного (прижимного) кольца, принятый в конструкции установки  $D = 98$  мм.

Для принятых конструктивных параметров установки  $\sigma_k = 72$  МПа, таким образом, условие (11) выполняется  $72 < 96$  МПа.

Для реализации предложенной методики исследования механических свойств создана установка

для гидравлического нагружения оболочек, схема и принцип работы которой проиллюстрированы на рис. 5. Принцип работы ее заключается в создании сложного напряженного состояния в оболочке путем выдавливания ее гидростатическим нагружением через окно, имеющее круглую форму. Оболочка 1 устанавливается на основании 2 и закрепляется кольцевым прижимом 3 с помощью зажимного устройства 4. Закрепление не требует больших усилий, так как имеет предварительный характер и сводится в выборке зазоров в цепи деталей прижим 3 – образец 1 – основание 2 – корпус 6.

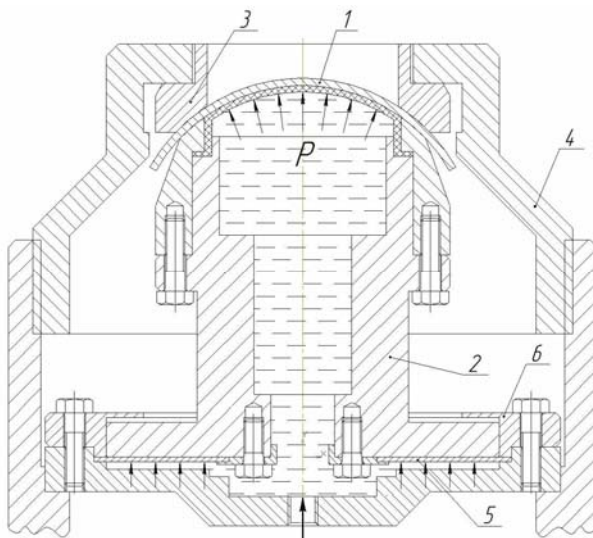


Рис. 5. Принцип действия установки для гидравлического нагружения оболочек

При создании в полости основания нарастающего гидростатического давления  $P$  происходит деформирование части оболочки, ограниченной окном.

Для того чтобы вместе с нарастанием давления увеличивалось усилие закрепления оболочки, основание 2 выполнено в виде кольцевого поршня, торец которого выходит в полость основания и воспринимает то же гидравлическое давление, что и оболочка. На поршне возникает пропорциональная давлению осевая сила, передающаяся на оболочку и закрепляющая ее тем сильнее, чем выше используемое гидравлическое давление. Таким образом, происходит автоматическое регулирование силы прижима образца в установке пропорционально рабочему давлению. Герметизация полости высокого давления обеспечивается с помощью эластичной прокладки 5. Сохранению целостности прокладки 5 при высоких давлениях способствует малая величина зазора между основанием (поршнем) 2 и корпусом 6, а также практически отсутствующие перемещения поршня при работе устройства. Общий вид установки для гидростатического нагружения оболочек приведен на рис. 6.



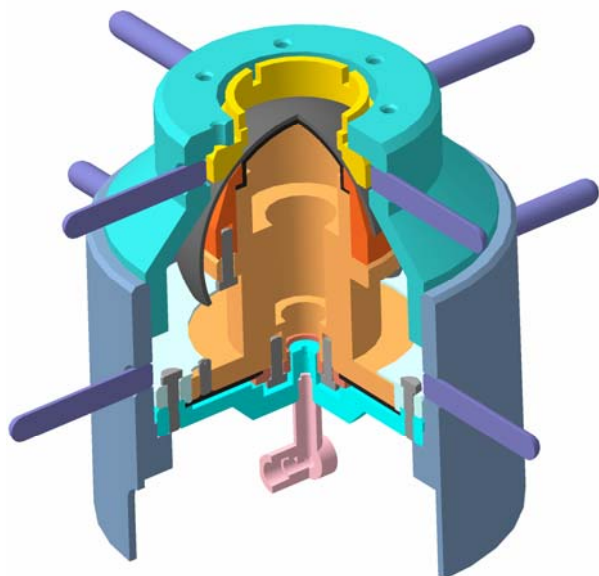


Рис. 6. Установка для гидравлического нагружения оболочек

Описанная выше устройство для гидростатического нагружения оболочек является новым, что подтверждает решение о выдаче патента на изобретение (заявка №2009134584/28(048695) от 11.08.2010).

Практической реализацией методики определения механических свойств стала разработка комплекса для испытания оболочек при гидростатическом нагружении изображенного на рис. 7.

Основой комплекса является установка для гидростатического нагружения оболочек 1, соединенная с насосной станцией НЭР-1,7И20Ф1 2 шлангами высокого давления. В замкнутую гидравлическую систему комплекса входят датчик давления 7 и манометр 9 для визуального контроля процесса нагружения и калибровки электронного датчика давления 7.

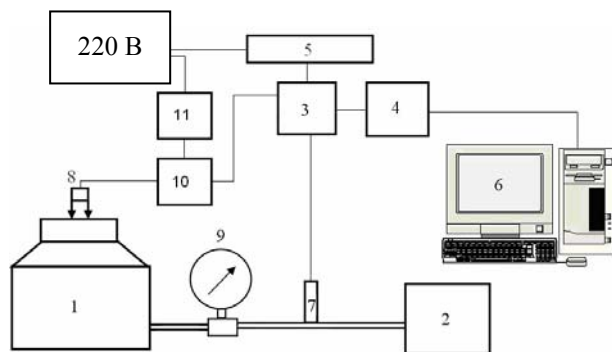


Рис. 7. Блок-схема комплекса для испытания полуоболочек при гидростатическом нагружении

В состав комплекса входит информационно-измерительный комплекс для регистрации текущей информации и обработки ее с целью получения диаграммы деформирования. На закрепленной в установке оболочке размещается экстензометр 8, со-

стоящий из основания и тензорезисторов, соединенных по мостовой схеме. Сигналы с экстензометра и датчика давления поступают в блок 3 обработки сигналов, а далее на аналого-цифровой преобразователь 4 (частота дискретизации 100 Гц) и персональный компьютер 6. Усиление сигнала с экстензометра производится при помощи тензоусилителя 10 (коэффициент усиления  $K_y = 10$ ), питание которого осуществляется при помощи блока питания 11. Для регистрации величины гидростатического давления рабочей жидкости служит датчик. Для энергоснабжения системы в ее состав входит источник питания 5.

Сбор и первичная обработка экспериментальной информации выполняется с помощью специально разработанного в КНИО 0509 программного пакета Meridian.

Для отработки методики определения механических свойств оболочек при их гидравлическом нагружении было испытано несколько видов образцов из алюминиевого сплава АМц ГОСТ 4784-97:

- образцы в виде шарового сегмента, представленные на рис. 8;

- образцы в виде полуоболочки, один из которых представлен на рис. 9.

Гидростатическое нагружение оболочки проводилось в трех зонах.



Рис. 8. Образцы в виде шарового сегмента из АМц до и после испытания



Рис. 9. Полуоболочка после испытания гидростатическим нагружением

В результате испытаний была получена зависимость сигналов датчиков давления и удлинения от времени. Переход от снимаемого напряжения в вольтах к усилиям и деформациям осуществлялся с помощью специально разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ программы Sigma и файлов калибровки, полученных с помощью программного пакета



Meridian. Для образца в виде полуболочки получили кривые  $\sigma_{nl} - \varepsilon_{nl}$ , изображенные на рис. 10 и 11.

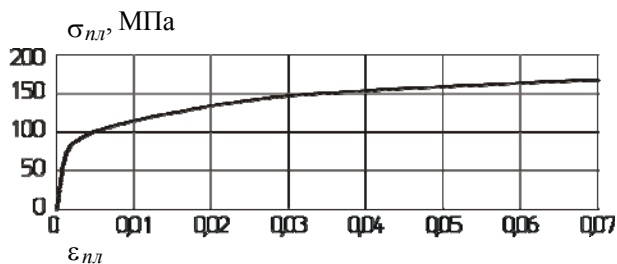


Рис. 10. Кривая  $\sigma_{nl} - \varepsilon_{nl}$  для образца в виде полуболочки с непрерывным нагружением

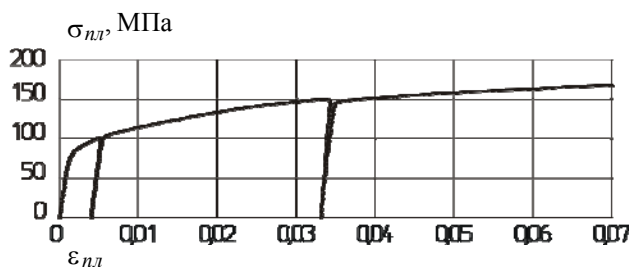


Рис. 11. Кривая  $\sigma_{nl} - \varepsilon_{nl}$  для образца в виде полуболочки с двумя разгрузками

Полученные кривые свидетельствуют о работоспособности предложенной схемы испытания. По их характеру видно, что информационно-измерительный комплекс обеспечивает хорошую точность регистрации экспериментальных данных. Средняя скорость деформирования в ходе опыта составляет  $\sim 10^{-2}$  1/с.

### Литература

1. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев, 1996.
2. Смирнов – Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Ленинград: Машиностроение, 1978.
3. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Москва, 1954. С. 647. Решетов Д. Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989.
4. Ряховский О. А. Детали машин. М.: МГТУ им. Баумана, 2004.
5. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1982. Т. 1, 2, 3.
6. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989.
7. Физико-механические свойства конструкционных материалов и некоторые современные методы их исследования: Справочное пособие. М.: ЦНИИ-Атоминформ, 1982.

## НОРМАЛИЗАЦИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПО КИСЛОРОДУ В ВОДЕ

Д. А. Любимцев, А. И. Мудрилов, В. М. Шалин, П. Н. Кавитов, Е. Ю. Давыдов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время центрифужная технология является основной и наиболее экономичной для разделения изотопов. Однако данная технология имеет свои ограничения. Одно из таких ограничений – разделение многоизотопных рабочих веществ с перекрытием молекулярных масс.

Другая трудность связана с обогащением изотопов элементов в составе низкомолекулярных соединений. Центрифужное разделение данных соединений сложнее, чем веществ имеющих большие молекулярные массы. Это связано с уменьшением радиального градиента давлений газа в роторе в связи с уменьшением молекулярной массы, легкими примесями (азот  $N_2$ , кислород  $O_2$ ) в каскадах.

Дополнительно к центробежному методу разделения, для получения высокообогащенных веществ, которые имеют изотопное перекрытие молекулярных масс, требуется разработка иных технологий обогащения. Одной из таких технологий является технология изотопного обмена.

Одним из востребованных веществ на рынке изотопов является диоксид углерода ( $CO_2$ ), обогащенный по изотопу  $^{13}C$ .  $CO_2$  является рабочим веществом для получения изотопа  $^{13}C$ , который широко используется в медицине, биологии. РФЯЦ-ВНИИЭФ в сотрудничестве в ГАЗ-ОЙЛ (г. Калининград) в 2006–2008 году получали обогащенный по изотопу  $^{13}C$   $CO_2$ . В ЭП 9663 (РФЯЦ-ВНИИЭФ) поступал предварительно обогащенный по изотопу  $^{13}C$  до 30 %  $CO_2$  лазерным методом разделения, необходимо было дообогатить  $CO_2$  по изотопу  $^{13}C$  свыше 99,0 %.

При обогащении центрифужным методом происходит накопление в продукте молекул  $CO_2$  с «тяжелыми» изотопами кислорода –  $^{17}O$ ,  $^{18}O$ . Согласно требованиям к изотопной продукции по содержанию данных изотопов – уровень не должен превышать природные значения, т. е. не более 0,25 %.

При получении продукта из  $CO_2$  с природным распределением изотопов задача отделения масс с «тяжелыми» изотопами кислорода стоит еще острее – содержание  $^{12}C$  с изотопом  $^{18}O$  после обогащения на каскаде сравнимо с целевой массой. Проведение дополнительного этапа по отделению центрифужным методом «тяжелых» изотопов кислорода приводит к значительному увеличению себестоимости продукции и дополнительным потерям рабочего вещества.

Для отделения молекулярных масс с «тяжелым» кислородом было принято решение о проведении гетерогенной реакции химического изотопного обмена (далее изотопный обмен).

В процессе получения наиболее предпочтительно совмещение разделения центрифужным методом и изотопного обмена, на разных этапах технологии получения изотопной продукции.

Достоинством метода изотопного обмена: является экономичность изотопного разделения и практически полное использование вещества при разделении. Недостатки: необходимость газовой фазы (не все элементы образуют стойкие газообразные соединения); неуниверсальность установок; разделительные каскады и колонны должны содержать значительные количества концентрируемых изотопов.

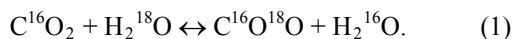
Изотопный обмен является одним из физико-химических способов получения изотопов. Изотопный обмен – реакция перераспределения изотопов какого-либо элемента между реагирующими веществами [1]. Элементный состав реагирующих веществ при этом не изменяется.

Изотопный обмен основан на химических реакциях, при которых происходит термодинамически равновесное перераспределение изотопов какого-либо элемента между реагирующими веществами. Так, например, при контакте  $HCl$  с  $HBr$ , в которых первоначальное содержание дейтерия в водороде было одинаковым, в результате обменной реакции в  $HCl$  содержание дейтерия (D) будет несколько выше, чем в  $HBr$ . Применение нескольких каскадов позволяет получать дейтерий и обогащенные отдельными изотопами смеси для других лёгких элементов ( $^6Li$ ,  $^7Li$ ,  $^{10}B$ ,  $^{11}B$ ,  $^{13}C$ ,  $^{15}N$ ,  $^{18}O$ ).

Для изотопов тяжёлых элементов неравномерность не превышает десятых долей процента, для изотопов лёгких элементов (от  $Li$  до  $Cl$ ) не превышает 10 %. Только для изотопов водорода неравномерность в распределении между некоторыми веществами достигает сотен процентов. Распределение изотопов между веществами в состоянии равновесия характеризуется коэффициентом распределения –  $K$ , определяющим соотношение равновесных концентраций изотопов в реагирующих веществах. При равномерном распределении изотопов  $K = 1$ . Отклонение от равномерного распределения зависит не только от массы изотопов, но и от химического со-

става веществ, между которыми происходит изотопный обмен.

При разделении изотопов кислорода наибольшее значение величины коэффициент разделения  $\alpha$  достигается при использовании реакции [ 2 ]:



Тяжёлый изотоп кислорода  $^{18}\text{O}$  накапливается в диоксиде углерода.

В области температур 278–373 К зависимость коэффициента разделения  $\alpha$  от температуры даётся уравнением (2):

$$\ln \alpha = \ln \alpha = \frac{8,247}{T} - 0,00969. \quad (2)$$

Скорость обмена для этой реакции очень мала, требуется значительное время для установления равновесия. Реакция образования угольной кислоты интенсифицирует процесс изотопного обмена по кислороду. При реакции происходит самопроизвольный процесс перераспределения изотопов кислорода в молекулах воды и диоксида углерода. Вода обогатится тяжёлым изотопом кислорода, а диоксид углерода обеднится им. Скорость протекания изотопного обмена всецело определяется механизмом реакций.

В нашем случае требовалась обратная задача – отделение от  $\text{CO}_2$  молекул с тяжёлым кислородом  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ . Принцип работы установки изображен на рис. 1, 2.

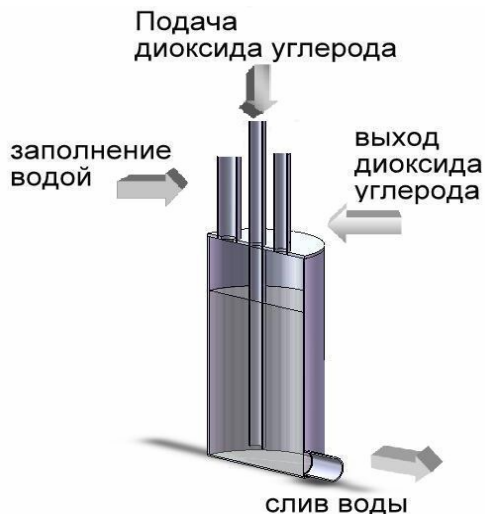


Рис. 1. Колонна нормализации изотопного состава

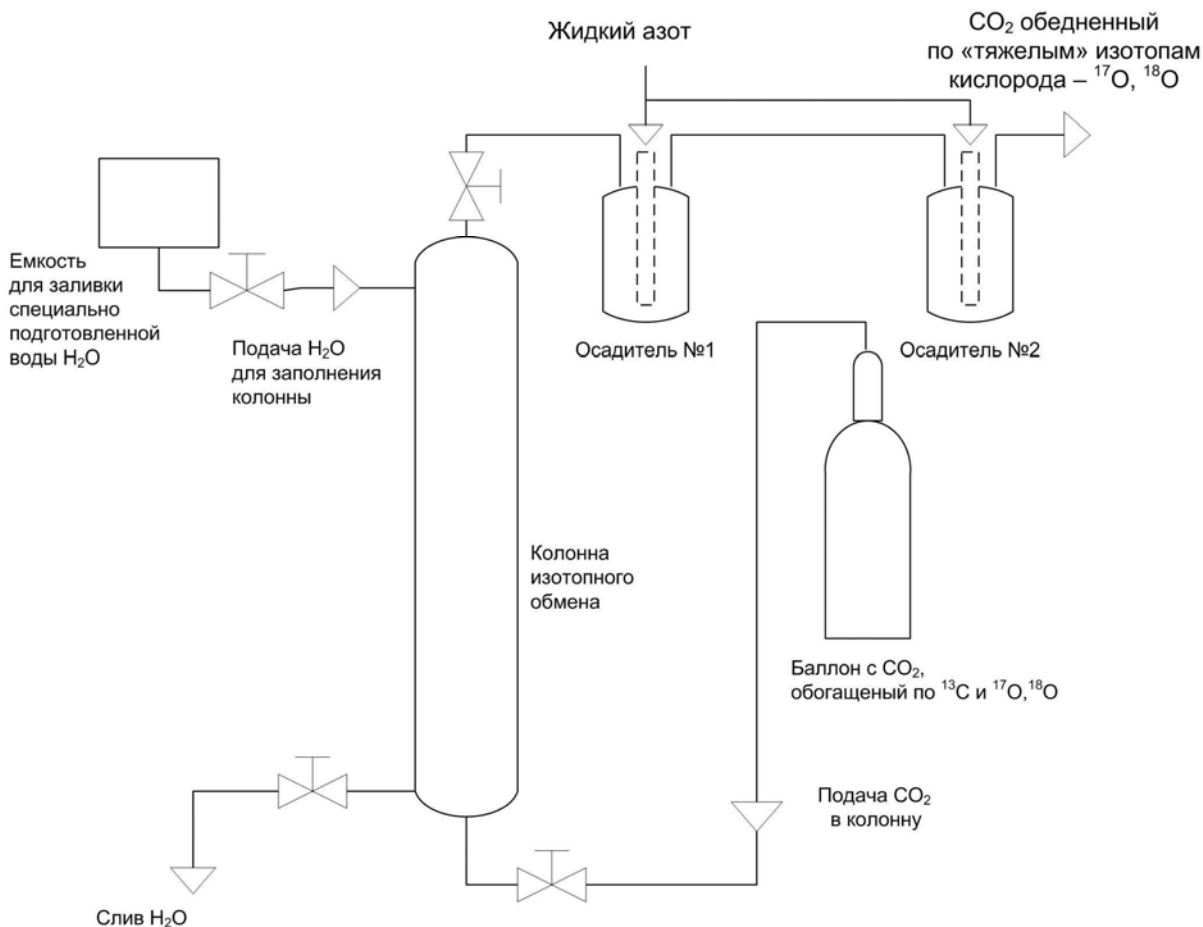
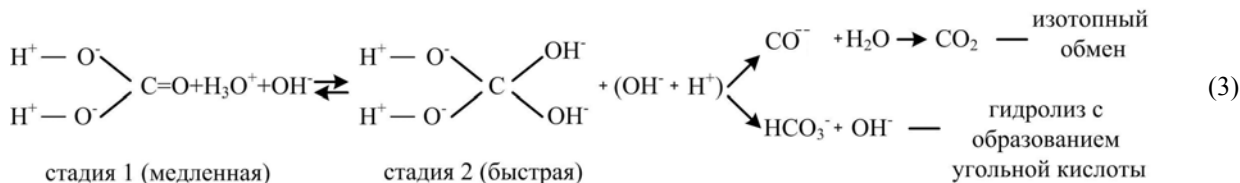


Рис. 2. Принципиальная схема установки изотопного обмена (нормализации) изотопного состава  $\text{CO}_2$  по кислороду

Более подробно реакция химического изотопного обмена приведена ниже [1]:



При взаимодействии  $\text{CO}_2$  с водой в незначительном количестве образуется угольная кислота. Происходит ионный изотопный обмен по кислороду в рабочей системе  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ .

Константа равновесия

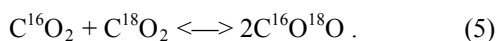
$$K = \frac{[\text{CO}_2^{18}]}{[\text{CO}_2^{16}]} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}^{16}]}{[\text{H}_2\text{O}^{18}]} = 1,03. \quad (4)$$

Происходит поляризация центрального иона  $\text{C}^+$  с присоединением иона  $\text{OH}^-$  и увеличение координационного числа с 3 до 4.

При использовании Pt (платина) в качестве катализатора и температуры  $\sim 1000^\circ\text{C}$  реакция изотопного обмена ускоряется и длится в течении  $\sim 10$  минут, при обычных условиях время протекания реакции  $\sim 6\div 12$  часов.

В настоящее время продолжается поиск эффективных и экономичных катализаторов для получения изотопа  $^{18}\text{O}$  в промышленном применении.

Также стоит отметить, что в рабочей системе  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  помимо реакции (1) будет протекать реакция [2]:



В ходе экспериментов установлены оптимальные параметры работы установки. Объем работ по нормализации незначителен (применяется на конечных стадиях получения изотопной продукции) и, следовательно, не требуется большая производительность установки. Установка собрана без усложнения конструкции (без использования дорогих катализаторов, высоких температур и давления) и эксплуатируется при комнатных температурах. Оптимальное рабочее давление в колонне  $7\text{--}10$  атм. Рабочее давление устанавливается с помощью вентиля на питающем баллоне и манометра на входе в колонну. Вода для рабочей системы  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  проходит специальную подготовку по очистке и деаэрированию (обезгаживается по  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ).

После проведения  $3\div 4$  полных обменных процессов в колонне и подтверждения ухудшения изотопного состава воды (ее обогащение «тяжелыми» изотопами кислорода) производится замена воды.

На выходе из колонны в двух осадителях, охлаждаемых жидким азотом, производится улавливание водяных паров, содержащихся в  $\text{CO}_2$ .

В процессе проведения эксперимента исследовалась кинетика изотопного обмена – проводились измерения времени стабилизации изотопного состава

(течение времени необходимого для установления равновесия по концентрации изотопов кислорода в реагирующих веществах), условия протекания изотопного обмена – давление, температура, катализаторы, неравномерность разделения между веществами в состоянии равновесия (коэффициент распределения).

Время установления равновесного изотопного состава по результатам изотопного анализа  $\text{CO}_2$  на масс-спектрометре МИ-1201 при данном рабочем давлении составило  $36\text{--}48$  часов (объем воды в колонне  $15$  литров, общий объем колонны  $23$  литра). Время нормализации состава зависит от рабочего давления в колонне разделения (рабочая система «жидкость–газ», в данном случае  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ).

По результатам измерений повышение температуры в рабочей системе до  $200^\circ\text{C}$  не приводит к ускорению изотопного обмена. Тем более, что повышенная температура в рабочей системе удорожает конструкцию оборудования, усложняет его эксплуатацию. Для интенсификации процесса образования угольной кислоты на входе  $\text{CO}_2$  в колонну предлагается использование решетчатой диафрагмы.

Перед изотопным обменом  $\text{CO}_2$  имело следующий содержание «тяжелых» изотопов кислорода (анализ на масс-спектрометре МИ-1201):

$\sim 0,5\%$  ( $M = 46$  а.е.м.) и  $0,3\%$  ( $M = 47$  а.е.м.).

После проведения изотопного обмена  $\text{CO}_2$  имело следующий изотопный состав по «тяжелым» изотомам кислорода (анализ на масс-спектрометре МИ-1201):

$\sim 0,15\%$  ( $M = 46$  а.е.м.) и  $0,07\%$  ( $M = 47$  а.е.м.).

После этого проводился заключительный этап разделения центрифужным способом для получения изотопной продукции – обогащение  $\text{CO}_2$  по изотопу  $^{13}\text{C}$  свыше  $99,5\%$ .

## Выводы

Проведение изотопного обмена на одном из этапов получения  $\text{CO}_2$  обогащенного по изотопу  $^{13}\text{C}$  позволило удовлетворить требованиям заказчика по обеднению  $\text{CO}_2$  по изотомам кислорода  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , снизить себестоимость производимой изотопной продукции и уменьшить потери.

Проведенная работа по изотопному обмену позволила усовершенствовать технологию обогащения  $\text{CO}_2$  по изотопу  $^{13}\text{C}$  свыше  $99,5\%$  для переработки больших партий сырья  $\text{CO}_2$  ( $\sim 55000$  литров).

В настоящее время прорабатывается вопрос получения изотопной продукции из  $\text{CO}_2$  с природным содержанием изотопов. При выполнении данных работ потребуются более глубокое внедрение данной технологии совместно с центрифужной технологией для нормализации изотопного состава  $\text{CO}_2$  по кислороду для последующего обогащения на центрифугах.

В дальнейшем планируется усовершенствование конструкции колонны для изотопного обмена (катализаторы, рассекатель и т. п.) и получения уточненных данных по протеканию данного процесса.

## Литература

1. Бродский А. И. Химия изотопов / 2 изд., М., 1957; Рогинский С. З. Теоретические основы изотопных методов изучения химических реакций. М., 1956.
2. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. В. Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
3. Виллани С. Обогащение урана. М., 1983.
4. Шемля М., Перье Ж. Разделение изотопов: пер. с франц. М., 1980.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ С ГЕЛИЕВЫМ ИОНИЗАЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ В ИССЛЕДОВАНИИ КАРБИДИЗАЦИИ УРАН-ГРАФИТОВОГО ТОПЛИВА ИМПУЛЬСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА БИГР

*А. В. Люцко, Г. П. Кустова, В. В. Сажнов, Н. А. Тесаловский*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время газовая хроматография является одним из наиболее точных и экспрессных методов количественного анализа газовых смесей. Хроматографический анализ представляет собой последовательный процесс: каждому вводу пробы соответствует разделение компонентов смеси на хроматографической колонке с адсорбентом или неподвижной жидкой фазой, сопровождаемое детектированием. Широкий выбор стационарных жидких фаз и адсорбентов, селективные чувствительные детекторы позволяют разделять и количественно определять соединения различного класса веществ. При решении какой-либо аналитической задачи методом газовой хроматографии, задача исследователя сводится к оптимальному выбору условий хроматографирования.

Целью данного исследования являлась разработка методики выполнения измерений содержания оксида углерода (II) в гелии с чувствительностью определения объемных долей оксида углерода менее  $10^{-3}$  %. Методика предназначена для аналитического сопровождения работ по изучению взаимодействия диоксида урана с углеродом в топливном материале активной зоны импульсного реактора БИГР.

## Введение

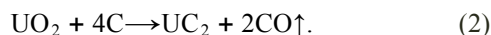
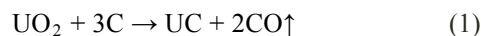
В РФЯЦ-ВНИИЭФ действует аperiодический импульсный ядерный реактор на быстрых нейтронах БИГР. Он эксплуатируется с 1977 г. и используется в качестве мощного источника нейтронного и  $\gamma$ -излучений в облучательных экспериментах по исследованию радиационной стойкости различных материалов и изделий, а также – для научных исследований по другим тематическим направлениям.

В реакторе БИГР в качестве топливного материала используется спрессованная, достаточно однородная смесь диоксида урана с графитом. Отношение числа ядер углерода к числу ядер  $^{235}\text{U}$  в смеси составляет  $\sim 16$  [1].

В процессе эксплуатации установки БИГР периодически осуществляется отбор проб гелия из герметичного корпуса реактора и связанного с ним ресивера. Хроматографический анализ газа показы-

вает, что основным примесным компонентом реакторного газа идентифицируется оксид углерода (II) (от  $10^{-3}$  до 2 %) [2]. Образование оксида углерода (II) может означать, что в реакторе происходит взаимодействие компонентов топлива.

В условиях печного нагрева взаимодействие диоксида урана с углеродом наблюдается при температурах выше  $\sim 1300$  °С. Этот процесс характеризуется многостадийностью; в зависимости от температуры и давления возможно одновременное протекание нескольких химических реакций. Образование оксида углерода (II) возможно по реакции восстановления диоксида урана углеродом, сопровождающееся образованием карбидов урана (карбидизация):



Специфика работы материала в составе активной зоны (АЗ) ядерного реактора заключается в воздействии на материал мощных потоков ионизирующего излучения. Предполагается, что в таких условиях, несмотря на относительно низкие рабочие температуры (не более 900 °С), возможно радиационно-химическое взаимодействие компонентов топлива.

Накопление оксидов углерода в порах графитовой матрицы может привести к изменению механических свойств топлива и геометрических характеристик деталей АЗ.

Целью проводимых в настоящее время работ является количественная оценка величины эффектов радиационного стимулирования в температурном интервале ниже 1000 °С.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью получения экспериментально аргументированной оценки ресурсных характеристик топливных элементов в аспекте обоснования безопасности эксплуатации установки.

Для аналитического сопровождения исследований возникла необходимость измерения содержания в гелии объемных долей оксида углерода (II) при концентрациях менее  $10^{-3}$  %.

Сравнительные характеристики газохроматографических детекторов [3]

№ п/п	Вид детектора	Тип детектора	Линейный динамический диапазон	Порог чувствительности, г
1	ДТП (детектор по теплопроводности)	универсальный	$10^6$	$10^{-4}$
2	Термохимический	универсальный	$10^6$	$10^{-6}$
3	ГИД (гелиевый ионизационный детектор)	универсальный	$10^5$	$10^{-12}$
4	Масс-спектрометрический	универсальный	$10^5$	$10^{-11}$
5	ИК-спектрометр	универсальный	$10^3$	$10^{-9}$
6	ПИД (пламенно-ионизационный детектор)	селективный	$10^6$	$10^{-10}$

Примечание – ПИД используется в варианте реакционной газовой хроматографии:  
 $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

### Разработка методики измерений содержаний оксида углерода (II)

Оксид углерода (II), химическая формула – CO, мол. масса – 28,01,  $T_{\text{кип}} = -191,5^\circ\text{C}$ .

С точки зрения хроматографической методологии для количественного определения низкокипящих газов:  $\text{H}_2$ , He,  $\text{N}_2$ , Ar,  $\text{O}_2$  и CO, в аналитической практике наиболее распространен вариант использования адсорбционной газовой хроматографии с разделением компонентов смеси на насадочной хроматографической колонке с цеолитом CaA и последующей регистрацией веществ детектором. Выбор детектора определяется, главным образом, тремя его характеристиками: селективностью, точностью и порогом чувствительности. Характеристики наиболее распространенных детекторов, используемых при анализе оксида углерода (II), приведены в табл. 1.

Из представленных в таблице сведений видно, что наиболее перспективными для высокочувствительного анализа оксида углерода (II) являются масс-спектрометрический и гелиевый ионизационный детекторы (ГИД).

При разработке методики использовали современный хроматограф – «TRACE GC Ultra», оснащенный гелиевым ионизационным детектором.

Принцип действия детектора основан на явлении электрической проводимости газов под действием электрических разрядов, пульсирующих в потоке гелия высокой чистоты. Образующиеся метастабильные атомы гелия имеют энергию 19,8 эВ и способны ионизировать практически любую молекулу:



Детектор состоит из кварцевой ячейки, в которую сверху подается ультрачистый гелий. Гелий достигает

зоны разряда, состоящей из нескольких электродов, соединенных с высоковольтным генератором импульсного разряда, и ионизируется. Поток элюата из хроматографической колонки направлен против потока гелия из зоны разряда и его компоненты ионизируются фотонами высокой энергии, которые являются результатом перехода гелия из метастабильного состояния в зоне разряда в основное стабильное состояние. Образующиеся электроны ускоряются и измеряются как электрический сигнал на коллекторном электроде. Схема ГИД показана на рис. 1.

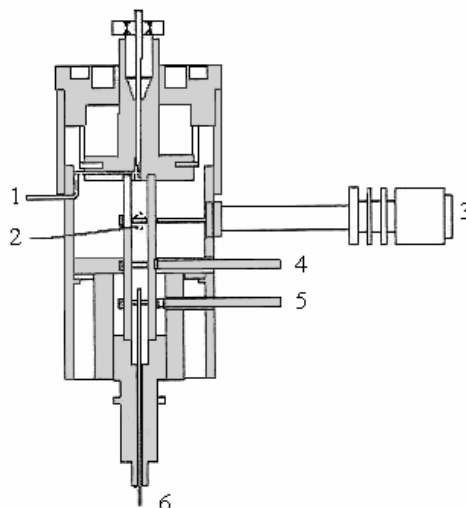


Рис. 1. Схема ГИД пульсирующего разряда: 1 – выход гелия; 2 – зона разряда; 3 – электрод высоковольтного разряда; 4 – поляризационный электрод (отклоняющий); 5 – коллекторный электрод (сигнальный); 6 – колонка

Использование в разделительной системе хроматографа капиллярной адсорбционной колонки типа «PLOT» с цеолитом CaA делает возможным разделение оксида углерода (II) и сопутствующих компонентов исследуемой смеси: аргона, кислорода,



азота и метана [4]. Вид типичной хроматограммы разделения компонентов представлен на рис. 2.

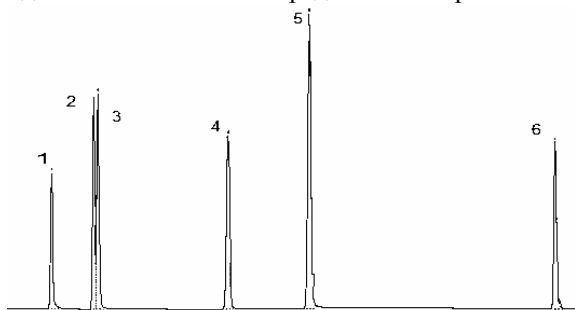


Рис. 2. Хроматограмма разделения компонентов: 1 – водород; 2 – аргон; 3 – кислород; 4 – азот; 5 – метан; 6 – оксид углерода (II)

Одной из особенностей проводимых работ являлась ограниченность количества газа в отбираемых пробах. При объеме газоотборников от 100 см<sup>3</sup> до 170 см<sup>3</sup> давление в пробе составляло ~ 1,1 атм и менее. Таким образом, возникала необходимость дозирования в хроматограф пробы газа, находящейся под разрежением, что не предусмотрено его конструкцией.

В систему пробоотбора дополнительно включили вакуумный насос РВН 20, обеспечивающий вакуумирование системы до конечного вакуума ~ 1,5 Па и манометр.

Перед началом анализа дозирующую петлю вакуумировали, затем распускали пробу, регистрировали давление газа и переключением потока газ-носителя вводили в хроматографическую колонку. Количество дозируемого газа определяли по газовому закону:

$$P \cdot V = \text{const.} \quad (5)$$

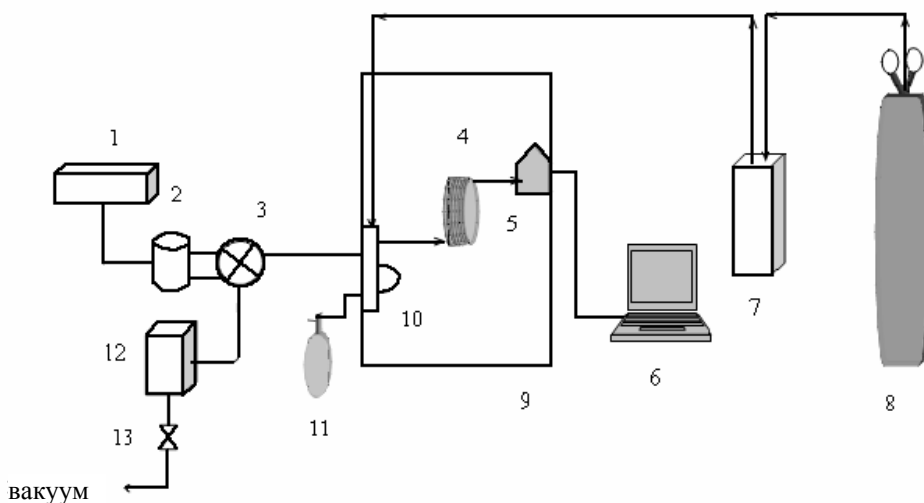


Рис. 3. Схема измерительного комплекса:

- 1 – манометр МЦ-2; 2 – преобразователь; 3 – вакуумный кран; 4 – колонка 5 – детектор; 6 – компьютер; 7 – очиститель гелия; 8 – источник газ-носителя (гелий); 9 – термостат хроматографа; 10 – кран дозатор и дозирующая петля; 11 – баллон с анализируемым газом; 12 – вакуумметр «Мерадат-ВТ12СТ2»; 13 – вакуумный вентиль

Схема измерительного комплекса на базе хроматографа «TRACE GC Ultra» представлена на рис. 3.

Для выполнения количественного анализа была проведена калибровка детектора: в диапазоне содержаний объемных долей углерода от 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-2</sup> % методом абсолютной многоточечной градуировки была установлена зависимость сигнала детектора от количества эталона, дозируемого в хроматограф. В качестве эталона использовали государственный стандартный образец (ГСО) с содержанием объемных долей оксида углерода (II) ~ 0,0049 % и 0,051 %. Градуировочные смеси с меньшим содержанием готовили методом последовательных разбавлений ГСО гелием. Для обработки результатов анализа применяли программное обеспечение «Chrom-Card».

Точность проводимых измерений оценили на основании статистических данных по значению доверительной границы погрешности анализа. Для чего в соответствии с ОСТ 95 924 в трех диапазонах содержаний объемных долей оксида углерода (II) от 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-4</sup> %; от 10<sup>-4</sup> до 10<sup>-3</sup> % и от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-2</sup> %, определили значения случайной  $\delta\varepsilon$ , % и систематической  $\delta\theta$ , %, составляющих погрешности измерений, установили их значимость и рассчитали значение относительной суммарной погрешности анализа  $\delta$ , %

$$\Delta = \sqrt{\delta\varepsilon^2 + \delta\theta^2} \quad (6)$$

Установленные максимальные значения составляющих суммарной погрешности представлены в табл. 2.

Метрологические характеристики МВИ ( $P=0,95$ ;  $n=3$ )

Метрологическая характеристика (МХ)	Значение МХ
Диапазон определяемых содержаний оксида углерода (II), об. доля %	$10^{-5} - 10^{-2}$
Верхняя граница относительного среднеквадратического отклонения ( ${}^{\circ}S_r$ )	0,062
Границы относительной случайной погрешности, $\delta\epsilon$ , %	$\pm 7$
Границы относительной неисклученной систематической погрешности, $\delta\theta$ , %	$\pm 14$
Границы суммарной погрешности, $\delta$ , %	$\pm 16$

Анализ полученных результатов показал, что основной составляющей систематической погрешности измерений является погрешность состава ГСО (10 %), в дальнейшем, за счет приобретения новых эталонов, доверительная граница относительной суммарной погрешности измерения может быть снижена до 12 % [5].

### Применение методики для оценки степени карбидизации уран-графитового топлива

К настоящему моменту завершен этап предварительных исследований процесса карбидизации уран-графитового топлива реактора БИГР.

Целью данного этапа являлась отработка методов исследования и экспериментальное подтверждение применимости разработанной методики для аналитического сопровождения исследований.

Условия, реализованные в экспериментах, характеризуются более низкой температурой ( $< 1050$  °С) по сравнению с установленной границей стабильности смеси диоксида урана и углерода в условиях неядерного нагрева (1300 °С) и малой ( $\sim 100$  с) длительностью воздействия. Этим определяется низкая интенсивность взаимодействия и соответственно малые количества

газообразных продуктов реакции.

Пробы газа для хроматографического анализа отбирали из ампулы через 4–6 дней после воздействия облучения. При этом было установлено, что образующиеся в ходе эксперимента газы обратимо сорбируются топливным материалом и практически не обнаруживаются в анализируемых пробах, и в дальнейшем облучательную ампулу перед отбором газа нагревали до температуры  $\sim 440$  °С.

Зафиксированное количество оксида углерода (II) использовалось в качестве количественной оценки степени взаимодействия компонентов топлива. При проведении расчетов предполагалось, что на каждую прореагировавшую молекулу  $UO_2$  образуются две молекулы CO. Исходное количество молекул диоксида урана рассчитано по величине заложенной массы ( $\sim 8 \cdot 10^{21}$ ).

Для оценки значимости результатов, получаемых при воздействии облучения, был проведен ряд сравнительных экспериментов по определению газовой выделения из образцов топлива в условиях печного нагрева. Основной целью экспериментов по печному нагреву являлась проверка качества процедур дегазации, вакуумирования, откачки и отбора проб для повышения достоверности получаемых результатов, выявления и исключения факторов, способных повлиять на конечный результат.

В табл. 3 представлены результаты предвари-  
Таблица 3

Результаты экспериментов

Тип воздействия	Печной нагрев	Облучение на реакторе БИГР		
		820	955	1060
Максимальная температура нагрева образцов, °С	710	820	955	1060
Температура отбора, °С	710	440	450	440
Концентрация CO, об. доля %	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Количество молекул CO	$\sim 2 \cdot 10^{16}$	$\sim 1 \cdot 10^{18}$	$\sim 2 \cdot 10^{18}$	$\sim 1 \cdot 10^{18}$
Оценка степени карбидизации $UO_2$ , %		$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$

тельных исследований.

Из представленных результатов видно, что при печном нагреве топлива «фоновое» количество оксида углерода (II) составляет  $\sim 10^{16}$  молекул; при облучении на реакторе БИГР количество молекул оксида углерода (II) возрастает  $\sim$  на 2 порядка, что говорит о взаимодействии компонентов топлива в рассматриваемых условиях и, предположительно, объясняется эффектами радиационного стимулирования процесса карбидизации уран-графитового топлива.

### **Заключение**

В докладе представлен метод газовой хроматографии с использованием гелиевого ионизационного детектора и его применение в экспериментах по исследованию твердофазного взаимодействия диоксида урана с углеродом в условиях облучения на реакторе БИГР.

Благодаря высокой чувствительности гелиевого ионизационного детектора разработанный метод позволил детектировать малые количества оксида уг-

лерода (II), что дало возможность выделить эффекты, обусловленные радиационным воздействием.

### **Литература**

1. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф., Воинов А. М., Смирнов И. Г. Апериодический импульсный реактор БИГР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1988. Вып. 1. С. 3–12.
2. Двадцать лет эксплуатации установки БИГР: Отчет о НИР. РФЯЦ-ВНИИЭФ Богданов В. Н., Смирнов И. Г., Кувшинов М. И., Пичугин А. М. инв. № 4/2754 дсп. 1999 г.
3. Лейбниц Э. Руководство по газовой хроматографии. Москва: Издательство Мир, 1988.
4. Тесаржик К. Капиллярные колонки в газовой хроматографии. Москва: Издательство Мир, 1987. С.
5. Исследование возможности использования метода капиллярной хроматографии с гелиевым ионизационным детектором для анализа газовых сред гермообъемов на содержание низкокипящих газов. Отчет о НИР. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Кустова Г. П., Люцко А. В. инв. № 4/4119 дсп. 2009.

## ВНЕДРЕНИЕ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОЙ РАЗГРУЗКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ЭНЕРГОБЛОКЕ № 2 РОСТОВСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

*П. П. Мезенцев, Б. В. Доровских, В. В. Люльчак, В. В. Мальшиев, Я. Б. Солдатов, П. С. Мартюков*

Московский филиал «Центратомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго», г. Москва

На современном этапе развития атомной энергетики со стороны энергосистемы предъявляются требования о необходимости участия энергоблоков атомной станции (АЭС) в противоаварийной защите энергосистемы.

Работа энергоблока по каналам противоаварийной автоматики (ПАА) реализуется в двух режимах:

- импульсная разгрузка турбогенератора (ИР ТГ) с возвратом на исходный уровень мощности;
- разгрузка турбогенератора с последующим фиксированным ограничением мощности (ОМ).

Импульсная разгрузка турбогенератора – это защита энергосистемы, инициируемая ПАА и приводящая к кратковременному быстрому снижению электрической нагрузки ТГ с последующим плавным восстановлением электрической мощности до исходного значения.

Разгрузка с последующим фиксированным ограничением мощности (ОМ) – это защита энергосистемы, инициируемая ПАА и приводящая к быстрому снижению электрической нагрузки ТГ до величины ограничения, установленного ПАА. Увеличение нагрузки энергоблока возможно после снятия сигнала ПАА по командам оперативного персонала.

К АЭС энергосистемами предъявляется требование по участию в ПАА, как в части разгрузки с ОМ, так и в части ИР. Поэтому в настоящее время необходимо проведение комплекса мероприятий по внедрению данных режимов на всех строящихся, а также на всех действующих энергоблоках России.

К реализации режима ИР предъявляются следующие критерии:

- величина сброса нагрузки соответствует заданной в соответствии с типом сигнала ИР («ИР 30 %», «ИР 50 %» и т. д.);
- время от момента выдачи инициирующего сигнала ИР с открытого распределительного устройства (ОРУ) АЭС до момента начала снижения мощности ТГ в соответствии с требованиями энергосистемы;
- скорость сброса нагрузки не ниже предельно допустимой в соответствии с требованиями энергосистемы;
- время восстановления мощности до исходного значения в соответствии с требованиями энергосистемы и динамикой переходных процессов во втором контуре энергоблока АЭС;

– отсутствие срабатывания аварийных технологических защит и блокировок, а также срабатывания аварийных уставок по основным параметрам энергоблока (давление в главный паровой коллектор (ГПК), уровни в парогенераторах, температура и давление в 1-м контуре и другие);

– выход на заданный уровень мощности при снятии инициирующего сигнала ИР.

Впервые режим ИР с проведением полномасштабных исследований динамических режимов на АЭС был внедрен на энергоблоке № 3 Калининской АЭС, в настоящее время режим ИР внедряется на энергоблоках № 1 и № 2 Ростовской АЭС.

На этапе опытно-промышленной эксплуатации на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС были проведены работы по внедрению режима ИР по каналам ПАА. К особенностям испытаний и внедрения режимов ИР на Ростовской АЭС следует отнести тот факт, что на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС используется турбина К-1000-60/1500-2 производства ОАО «Турбоатом» (номинальная частота вращения 1500 об/мин), полномасштабные исследования по внедрению режима ИР на которой ранее не проводились.

Условно можно разделить работу по внедрению режима ИР на несколько этапов:

– аналитический расчет возможности внедрения режима ИР на энергоблоках, включающий динамический расчет протекания режима;

– анализ алгоритмов технологических защит и блокировок, срабатывающих в ходе протекания режима ИР;

– испытания электронно-гидравлической системы регулирования (ЭГСР) турбины в режиме имитации ИР ТГ на остановленной турбине;

– испытания по проведению ИР ТГ на энергоблоке на различных уровнях мощности (50, 75 и 100 % от номинального уровня мощности РУ).

На энергоблоке № 2 Ростовской АЭС ИР представляет собой быстрое снижение мощности ТГ за счет закрытия регулирующего клапана (РК) турбины, путем подачи на электрогидравлический преобразователь (ЭГП) форсирующего тока в течение 0,3–1,5 секунды, с последующим его снятием по экспоненциальному закону. Выбор амплитуды и длительности импульса форсирующего тока должен производиться с учетом экспериментальных зависимостей глубины разгрузки от параметров импульса.

Таким образом, одной из основных задач реализации режима ИР на энергоблоке является корректная настройка формы импульса форсирующего тока, которая позволит выполнить все критерии успешного проведения испытания режима ИР.

Важным вопросом при реализации режима ИР является решение о возможности/необходимости закрытия регулирующих заслонок (РЗ) турбины. С одной стороны, закрытие РЗ позволяет значительно увеличить скорость сброса нагрузки ТГ за счет перекрытия поступления пара в цилиндры низкого давления (ЦНД), аккумулированного в сепараторах-пароперегревателях (СПП). С другой стороны, продолжительное закрытие РЗ может привести к чрезмерному (вплоть до критических величин) повышению давления пара в СПП.

Предварительный аналитический расчет возможности проведения ИР на турбине К-1000-60/1500-2 был выполнен ОАО «Турбоатом». По результатам расчета был сделан вывод о возможности внедрения режима ИР на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС. Кроме этого, в ходе исследований были рекомендованы амплитуда и длительность импульса форсирующего тока на ЭГП. Результаты этого расчета были использованы, как отправная точка при выполнении этапа испытания электрогидравлической системы регулирования (ЭГСР) турбины в режиме имитации импульсной разгрузки ТГ.

Был проведен анализ алгоритмов технологических защит и блокировок турбинного отделения с целью выявления и устранения вероятных ложных и некорректных срабатываний алгоритмов в процессе протекания режима ИР. Результатом этой работы стали разработка и внедрение на энергоблоке Ростовской АЭС ряда технических решений по корректировке алгоритмов технологических защит и блокировок турбинного отделения. В частности на время процесса ИР ТГ (20 секунд) были исключены переводы слива конденсата греющего пара подогревателя низкого давления (ПНД), конденсатосборника (КС-1) СПП, сепаратосборника (СС) СПП и команды на открытие рециркуляции конденсатного электронасоса (КЭН-2) и клапана импульсного соленоидного (КИС).

Этап испытания ЭГСР турбины в режиме имитации импульсной разгрузки ТГ на остановленной турбине проводился на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС и состоял из серии экспериментов, целью которых было определение возможности проведения ИР на аппаратуре ТПТС51 (производство ФГУП «ВНИИА») для энергоблока № 2, а также экспериментальное уточнение параметров, характеризующих режим ИР.

В ходе испытаний на ЭГП из ЭГСР подавался импульс форсирующего тока различной длительности и амплитуды при различной исходной степени открытия РК, соответствующей различному исходному уровню электрической мощности ТГ.

По результатам проведения испытаний ЭГСР турбины К-1000-60/1500-2 в режиме имитации

ИР ТГ был сделан вывод, что алгоритмы ИР ТГ, реализованные в ЭГСР на аппаратуре ТПТС51, являются работоспособными, программно-технические особенности аппаратуры не препятствуют проведению испытаний по ИР ТГ на действующем оборудовании.

Также были уточнены рекомендуемые параметры настройки амплитуды и длительности форсирующего тока. Окончательные параметры настроек алгоритмов ИР должны быть уточнены по результатам проведения испытаний ИР ТГ на действующем оборудовании.

Необходимо отметить, что в результате испытаний было определено значение форсирующего тока при различной исходной степени открытия РК, при котором не производится закрытие РЗ турбины. Было принято решение, что на первых испытаниях величину форсирующего тока необходимо выбирать исходя из условия недопущения закрытия РЗ. Решение о закрытии РЗ для увеличения скорости снижения мощности ТГ принять после рассмотрения результатов испытаний «Системным оператором».

19.05.2010 г. на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС были проведены испытания ТГ в режиме ИР. Испытания проводились на уровне мощности 450 МВт. Иницирующим сигналом был сигнал «ИР 30%», выдаваемый с ОРУ Ростовской АЭС, то есть снижение мощности должно было составить 30 % от номинальной – (300 МВт). Величина форсирующего тока была установлена равной 300 мА, время удержания форсирующего тока – 0,5 с. Характеристики форсирующего тока представлены на рис. 1.



Рис. 1. График зависимости электрической мощности от импульса форсирующего тока на ЭГП при проведении испытаний режима «ИР 30 %» на уровне исходной мощности 450 МВт

В соответствии с результатами испытаний мощность генератора была снижена на величину 200 МВт за 1, 2 секунды, с 450 МВт до 250 МВт (рис. 1), при этом скорость снижения мощности ТГ составила 167 МВт/с. Затем мощность генератора за 9 секунд снизилась до 90 МВт. После окончания режима ИР через 30 секунд уровень мощности генератора составил 400 МВт.

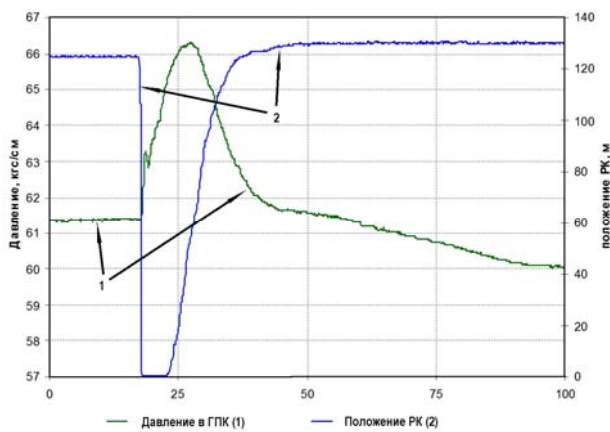


Рис. 2. Давление пара в ГПК и положение РК ЦВД при проведении испытаний режима «ИР 30 %» на уровне исходной мощности 450 МВт

На рис. 2 показан график изменения давления пара в ГПК и положения РК ЦВД во время проведения испытаний. Из графика видно, что аварийная уставка по давлению пара в ГПК 67 кгс/см<sup>2</sup>, при срабатывании которой производится открытие РК быстродействующей редукционной установки отвода пара в конденсатор (БРУ-К), достигнута не была. Кроме этого, на время восстановления мощности ТГ и заброс давления пара в ГПК значительно повлияло то, что во время работы режима ИР РК ЦВД были закрыты в течение 5 секунд.

Очевидным является тот факт, что уменьшение времени режима ИР позволит значительно уменьшить заброс давления пара в ГПК, поэтому было решено изменить форму восстановления форсирующего тока (красная линия на рис. 1), благодаря чему время прохождения режима ИР при последующих динамических испытаниях сократилось с 30–40 до 5–10 секунд.

Учитывая, что открытие РК ЦВД начинается только после восстановления тока на ЭГП до величины, при которой «всплывают» отсечные золотники, было предложено сразу же после снятия форсирующего тока ИР восстанавливать ток на ЭГП до значения 120 мА (рисунок 1), что при исходной мощности 450 МВт соответствует величине «всплытия» отсечных золотников.

После внесения корректировок по результатам испытания на уровне мощности реакторной установки (РУ) 50 %  $N_{НОМ}$  были проведены динамические испытания энергоблока в режиме импульсной разгрузки на 30 %  $N_{НОМ}$  на уровне мощности РУ 75 %  $N_{НОМ}$ . Исходное состояние:

- автоматический регулятор мощности реактора (АРМР) в режиме «Н»;
- ЭГСР в режиме поддержания давления «РД-1»;
- давление пара в ГПК = 60,6 кгс/см<sup>2</sup>;
- электрическая мощность ТГ = 693,6 МВт;
- положение сервомоторов РК11,12 = 162,75 мм, РК13,14 = 165,96 мм.

По факту поступления команды от противоаварийной автоматики на импульсную разгрузку ТГ в ЭГСР сформировался форсирующий ток на закрытие

регулирующих клапанов величиной 350 мА длительностью 0,3 секунды с последующим снятием форсирующего тока до 120 мА. Степень открытия регулирующих клапанов по факту поступления в ЭГСР сигнала ИР уменьшилась с исходного значения 162 мм до 51 мм (главный сервомотор (ГСМ 1)) и 73 мм (ГСМ 2) за 0,5 - 0,7 секунды. Время снижения электрической мощности ТГ с исходного уровня (689 МВт) до минимального значения (383 МВт) составило 0,7 секунды. Далее по мере снятия удерживающего тока происходило открытие регулирующих клапанов до исходного положения. После полного снятия удерживающего тока произошло прикрытие регулирующих клапанов на 4 мм, что привело к снижению скорости восстановления электрической мощности ТГ. Время открытия регулирующих клапанов до исходного положения составило  $\approx 7,4$  секунды. Электрическая мощность ТГ на момент снятия форсирующего тока составила 606 МВт.

По признаку ИР импульсной командой длительностью 3 секунды БРУ-К принудительно открылись до положения  $\approx 35$  %, сформировался режим сброса нагрузки, далее регулятор БРУ-К работал в соответствии с алгоритмом сброса нагрузки, при этом давление в ГПК увеличилось с 60,6 кгс/см<sup>2</sup> до 62,3 кгс/см<sup>2</sup>. По факту работы регулятора БРУ-К ЭГСР переключилась в режим «РМ». После полного закрытия всех РК БРУ-К ЭГСР перешла в режим регулятора номинального давления («РД-1») с заданным значением по давлению равным 62,2 кгс/см<sup>2</sup>. Электрическая мощность ТГ при переходе ЭГСР в режим «РД-1» составила 626 МВт. Дальнейшее увеличение электрической мощности ТГ до исходного уровня могло бы быть обеспечено за счет приведения текущего давления в ГПК к заданному значению давления в ГПК, записанному в момент поступления команды ИР.

После снятия режима ИР 30 % текущая мощность не соответствовала исходному значению мощности до момента поступления команды ИР. Причиной такого несоответствия стало то, что давление в ГПК после снятия режима ИР не соответствовало значению давления до момента поступления команды ИР. Для восстановления мощности ТГ до исходного уровня (при условии отсутствия изменения нейтронной мощности РУ) было реализовано «замораживание» текущей уставки давления в ГПК в момент поступления команды на ИР ТГ, до полного закрытия БРУ-К при условии, что АРМР не изменял режима работы. Графики электрической мощности генератора, давления пара в ГПК, положение сервомотора (СМ) РК приведены на рис. 3, 4.

С учетом внесения корректировок в алгоритм формирования ИР по результатам испытания на уровне мощности РУ 50 %  $N_{НОМ}$  и 75 %  $N_{НОМ}$ , были проведены динамические испытания энергоблока в режиме импульсной разгрузки на 50 %  $N_{НОМ}$  на уровне мощности РУ 100 %  $N_{НОМ}$ . Исходное состояние перед началом испытания следующие:

- АРМР в режиме «Н»;
- ЭГСР в режиме поддержания давления «РД-1»;
- давление пара в ГПК равно 60,01 кгс/см<sup>2</sup>;
- электрическая мощность ТГ равна 1000,7 МВт;
- положение сервомоторов РК11,12 равно 224,46 мм, РК13,14 равно 229,22 мм.

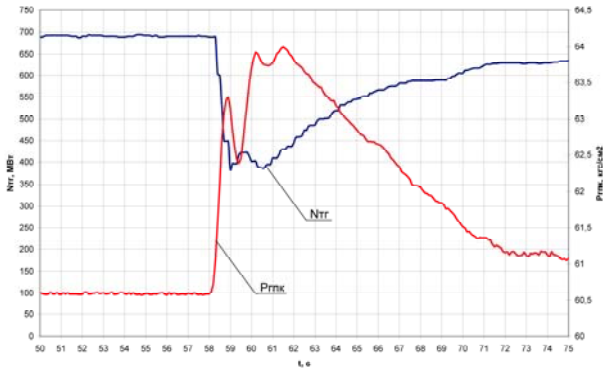


Рис. 3. Электрическая мощность ТГ и давление пара в ГПК

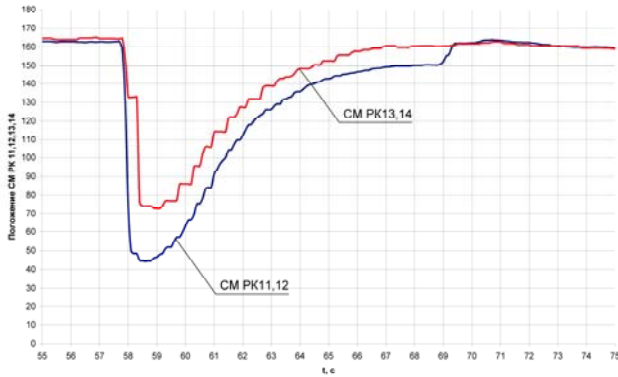


Рис. 4. Положение сервомоторов РК 2SE11,12,13,14S01

По факту поступления команды от ПАА на ИР ТГ в ЭГСР сформировался форсирующий ток на закрытие РК величиной 500 мА и длительностью 0,3 секунды с последующим снятием форсирующего тока до 120 мА. Степень открытия РК по факту поступления в ЭГСР сигнала ИР уменьшилась с исходного значения 224,46 мм (ГСМ-1) и 229,22 мм (ГСМ-2) до 10,80 мм (ГСМ-1) и 42,82 мм (ГСМ-2) за 0,42 секунды. Время снижения электрической нагрузки ТГ с исходного уровня (1000,7 МВт) до минимального (504,88 МВт) составило 0,71 секунды, что соответствует скорости 690 МВт/с. Далее, по мере снятия удерживающего тока, происходило открытие РК до исходного положения. Время открытия РК до исходного положения составило  $\approx 10$  секунд. Электрическая мощность ТГ на момент снятия форсирующего тока составила 950 МВт. По команде из алгоритма ИР импульсной командой длительностью 5 секунд РК БРУ-К принудительно открылись до

положения  $\approx 41$  %, при этом давление в ГПК увеличилось с 60,01 кгс/см<sup>2</sup> до 64 кгс/см<sup>2</sup>.

Время от момента выдачи сигнала «ИР» на ОРУ блока вспомогательного сооружения (БВС) до момента выдачи форсирующего тока из ЭГСР составило 0,2 с. Время от момента выдачи сигнала «ИР» на ОРУ БВС до закрытия регулирующих клапанов составило 0,66 с. В ходе анализа полученных результатов испытания установлено, что показатели качества прохождения ИР улучшены по сравнению с результатами предыдущих испытаний. Графики электрической мощности генератора, давления пара в ГПК, положение СМ РК приведены на рис. 5, 6.

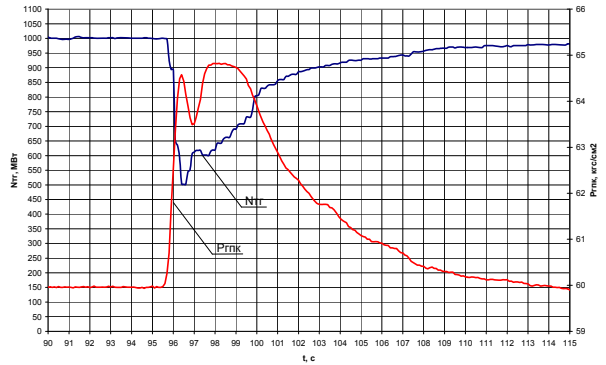


Рис. 5. Электрическая мощность ТГ и давление пара в ГПК

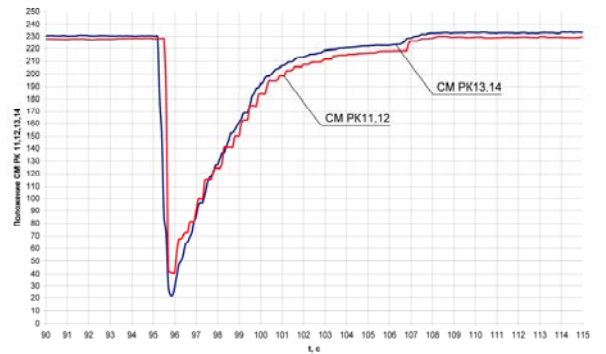


Рис. 6. Положение сервомоторов РК 2SE11,12,13,14S01

При прохождении сигнала ИР на мощности энергоблока 100 % от номинальной, производится отключение подогревателя высокого давления (ПВД), а также производится перевод питания паром основных потребителей с отборов от турбины на отбор от коллектора собственных нужд (КСН). В связи с этим был реализован алгоритм запрета перевода сливов на время прохождения сигнала ИР.

По результатам проведения динамических испытаний по реализации ИР на уровнях мощности РУ 50, 75 и 100 % от номинальной, параметры, характеризующие режим ИР (величина форсирующего тока, время удержания форсирующего тока, величина тока после окончания времени удержания форсирующего



тока, постоянная времени экспоненциальной части стекания тока по окончании удержания форсирующего тока) были аппроксимированы в зависимости от исходного уровня электрической мощности в момент формирования инициирующего сигнала ИР в диапазоне электрической мощности от 30 до 100 % от номинальной и внесены в алгоритм формирования ИР.

По итогам динамических испытаний предъявляемые «Системным оператором» критерии протекания ИР выполнены. Можно сделать вывод об успешном выполнении работ по внедрению режима ИР на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС. Тем не менее, одним из основных направлений в усовершенствовании алгоритма протекания ИР является сокращение

времени реакции программного технического комплекса (ПТК) ЭГСР на инициирующий сигнал ИР и последующее формирование форсирующего тока на ЭГП до 50 мс. Решение данной проблемы связано с разработкой новых аппаратных средств. Работы в этом направлении в настоящее время ведутся.

Основываясь на опыте проведения работ по внедрению режима ИР на энергоблоке № 3 Калининской АЭС и энергоблоке № 2 Ростовской АЭС, в будущем будут проведены работы по внедрению режима ИР на всех действующих атомных энергоблоках России. В настоящее время ведутся работы по внедрению режима ИР на энергоблоке № 1 Ростовской АЭС.

# СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗОВЫХ СРЕД, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Т. А. Морозова, В. А. Афанасьев, А. А. Бадыгеев, Л. Ф. Беловодский, М. П. Кужель, В. И. Сухаренко, Р. М. Тагиров, С. М. Царёва*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## 1. Введение

Благодаря малой теплопроводности и сравнительно невысокому удельному весу органические материалы в настоящее время активно используются в целях теплоизоляции разного рода конструкций. К числу наиболее распространенных органических теплоизоляционных материалов принадлежат древесина и пенопласты различных марок. Согласно справочным данным [1] коэффициент теплопроводности указанных материалов не превышает десятых долей Вт/(м · К), а удельный вес находится в интервале от сотни до двух тысяч кг/м<sup>3</sup>, что значительно ниже аналогичных характеристик металлических конструктивных материалов.

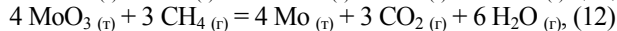
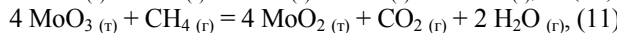
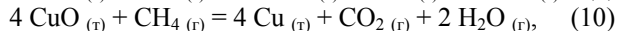
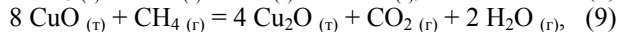
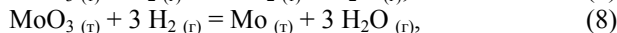
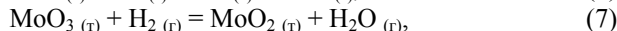
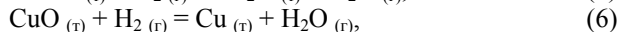
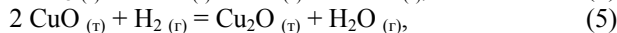
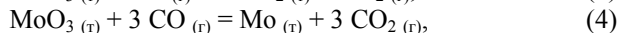
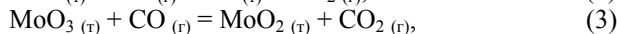
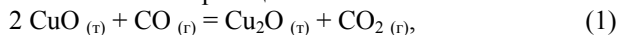
Существенным недостатком, накладывающим ограничение на область эксплуатации органических теплоизоляционных материалов, является их склонность к термодеструкции под влиянием высокотемпературных тепловых воздействий. По экспериментальным данным, представленным в [2] – [6], процесс термодеструкции органических материалов в условиях недостатка кислорода (например, в изолированном от окружающей среды пространстве конструкции) сопровождается образованием газовых сред, содержащих в своем составе оксид углерода (II), углеводороды (преимущественно метан) и водород. Принимая во внимание то, что все перечисленные газы относятся к горючим [7], газовые среды, образующиеся в результате термодеструкции органических материалов, являются потенциально опасными. Контакт последних с кислородом воздуха в условиях воздействия высоких температур может вызвать резкое ускорение экзотермических реакций окисления и тем самым инициировать воспламенение и/или взрыв. Таким образом, содержание оксида углерода (II), метана и водорода в газовых средах, образующихся при термодеструкции органических теплоизоляционных материалов, может оказывать влияние на состояние и безопасность конструкции. В связи со сказанным выше, разработка мер по снижению содержания указанных горючих компонентов в данных газовых средах становится актуальной задачей.

В соответствие с указанной задачей в настоящей работе исследовалась возможность применения оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения содержания оксида углерода (II), метана и

водорода в газовых средах, образующихся в результате термодеструкции органических теплоизоляционных материалов. Путем расчета по уравнениям химических реакций показано какое количество каждого из выше перечисленных горючих газов один грамм оксида меди (II)/оксида молибдена (VI) превратит в негорючие – оксид углерода (IV) и/или пары воды. Экспериментально методами газохроматографического анализа и сравнительной оценки горючести установлено, что применение оксидов меди и молибдена позволяет уменьшить содержание оксида углерода (II), метана и водорода в газовых средах и снизить их пожаровзрывоопасность. Объектом исследования в работе служила газовая среда продуктов совместной термодеструкции древесины, обработанной антипиреном, (далее по тексту древесина) и пенопласта ЭТ-1, взятых в соотношении два к одному по массе.

## 2. Расчетная часть

Взаимодействие оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) с горючими компонентами газовой среды (оксидом углерода (II), метаном, водородом) можно представить с помощью следующих уравнений химических реакций:



где т – твердое агрегатное состояние вещества; г – газообразное агрегатное состояние вещества.

Возможность протекания химических реакций, описываемых уравнениями (1) – (8), подтверждается данными, представленными в литературе [8] – [12]. Согласно приведенным источникам оксид углерода (II) и водород реагируют с оксидами меди и молибдена в довольно широком интервале температур – от

25 °С до 1000 °С, восстанавливая их до оксидов с меньшей степенью окисления или металлического состояния, сами при этом окисляясь соответственно до оксида углерода (IV) и паров воды. По причине того, что в литературе не приведено какой-либо информации относительно взаимодействия оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) с метаном возможность протекания реакций, описываемых уравнениями (9) – (12), оценивалась путем термодинамического расчёта по следующему уравнению химической термодинамики [13], [14]:

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T \cdot \Delta S_T, \quad (13)$$

где  $\Delta G_T$  – изменение энергии Гиббса реакции при температуре  $T$ , Дж;  $\Delta H_T$  – тепловой эффект химической реакции при температуре  $T$ , Дж;  $T$  – температура, К;  $\Delta S_T$  – изменение энтропии химической реакции при температуре  $T$ , Дж/К.

При выполнении термодинамического расчета использовались справочные данные [15], [16]. Расчет проводился в температурном интервале от 25 °С до 800 °С. Верхняя температурная граница расчетного интервала выбрана исходя из условий температурного режима, применявшегося в работе для получения исследуемой газовой среды. Возможность протекания химических реакций согласно законам химической термодинамики определялась отрицательным знаком величины  $\Delta G_T$ . Результаты выполненного расчета приведены на рис. 1.

По данным представленным на рис. 1 видно, что химическое взаимодействие оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) с метаном, описываемое уравнениями реакций (9) – (11), с точки зрения химической термодинамики возможно во всем рассматриваемом интервале температур от 25 °С до 800 °С; а взаимодействие оксида молибдена (VI) с метаном, описываемое уравнением (12), - в интервале температур от 300 °С до 800 °С.

В табл. 1 представлены результаты расчета количества горючих газов (см<sup>3</sup>), превращенных одним граммом оксида меди (II)/оксида молибдена (VI) в негорючие газообразные вещества – оксид углерода (IV) и пары воды.

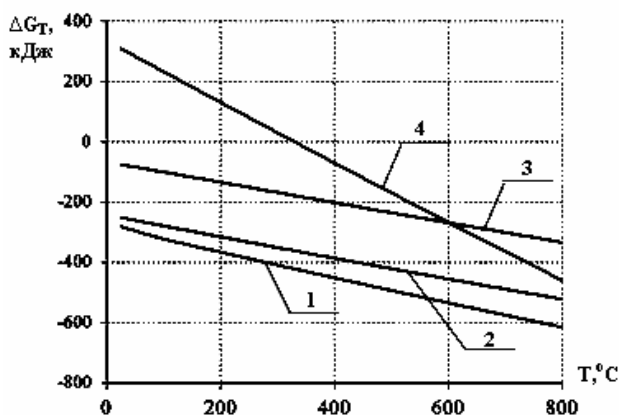


Рис. 1. Результаты термодинамического расчета:  
 1 –  $8 \text{ CuO}_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Cu}_2\text{O}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$ ;  
 2 –  $4 \text{ CuO}_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Cu}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$ ;  
 3 –  $4 \text{ MoO}_3_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ MoO}_2_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$ ;  
 4 –  $4 \text{ MoO}_3_{(г)} + 3 \text{ CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Mo}_{(г)} + 3 \text{ CO}_2_{(г)} + 6 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$

Как видно по результатам расчета один грамм оксида меди (II) согласно расчетам может превратить в пары воды до 280 см<sup>3</sup> водорода. Применительно к оксиду молибдена (VI) данная величина составляет порядка 469 см<sup>3</sup>.

Эффективность применения оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) на практике оценивалась по результатам газохроматографического анализа и сравнительной оценки горючести.

Таблица 1

Результаты расчета по уравнениям химических реакций оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) с горючими компонентами газовой среды

Уравнение химической реакции	Горючий компонент (см <sup>3</sup> )/ 1 грамм оксида
Оксид меди (II)	
$2 \text{ CuO}_{(г)} + \text{CO}_{(г)} = \text{Cu}_2\text{O}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)}$	140,8
$\text{CuO}_{(г)} + \text{CO}_{(г)} = \text{Cu}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)}$	281,6
$2 \text{ CuO}_{(г)} + \text{H}_2_{(г)} = \text{Cu}_2\text{O}_{(г)} + \text{H}_2\text{O}_{(г)}$	141,1
$\text{CuO}_{(г)} + \text{H}_2_{(г)} = \text{Cu}_{(г)} + \text{H}_2\text{O}_{(г)}$	282,2
$8 \text{ CuO}_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Cu}_2\text{O}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$	35,1
$4 \text{ CuO}_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Cu}_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$	70,4
Оксид молибдена (VI)	
$\text{MoO}_3_{(г)} + \text{CO}_{(г)} = \text{MoO}_2_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)}$	155,8
$\text{MoO}_3_{(г)} + 3 \text{ CO}_{(г)} = \text{Mo}_{(г)} + 3 \text{ CO}_2_{(г)}$	469,2
$\text{MoO}_3_{(г)} + \text{H}_2_{(г)} = \text{MoO}_2_{(г)} + \text{H}_2\text{O}_{(г)}$	155,8
$\text{MoO}_3_{(г)} + 3 \text{ H}_2_{(г)} = \text{Mo}_{(г)} + 3 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$	469,2
$4 \text{ MoO}_3_{(г)} + \text{CH}_4_{(г)} = 4 \text{ MoO}_2_{(г)} + \text{CO}_2_{(г)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$	39,0
$4 \text{ MoO}_3_{(г)} + 3 \text{ CH}_4_{(г)} = 4 \text{ Mo}_{(г)} + 3 \text{ CO}_2_{(г)} + 6 \text{ H}_2\text{O}_{(г)}$	117,3

Примечание. Расчеты проведены для стандартных условий (температура 298,15 К и давление 101325 Па).

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Получение газовой среды

Газовую среду для исследований в работе получали путем нагревания древесины, обработанной антипиреном, и пенопласта ЭТ-1 в разреженной атмосфере без доступа воздуха. Схема применявшейся для этой цели лабораторной установки представлена на рис. 2.

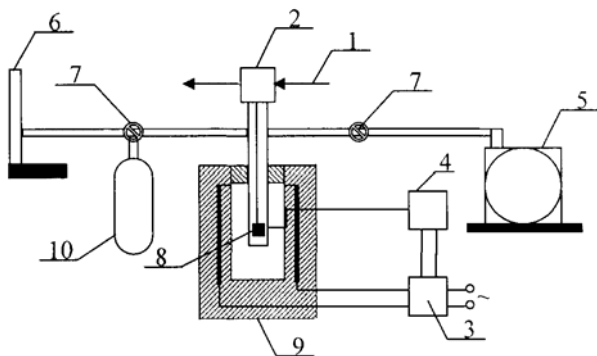


Рис. 2. Схема лабораторной установки для получения газовой среды для исследований:

- 1 – водяное охлаждение; 2 – кварцевая пробирка;  
3 – ЛАТР; 4 – программатор температурного режима;  
5 – форвакуумный насос; 6 – ртутный манометр; 7 – краны;  
8 – навеска органических теплоизоляционных материалов;  
9 – печь; 10 – приемник газовой среды

Перед началом эксперимента навески древесины и пенопласта ЭТ-1 (8) помещали в кварцевую пробирку (2). Масса навесок древесины составляла порядка 1 г, а масса навесок пенопласта – 0,5 г. Затем пробирку (2) вакуумировали до давления, не превышающего 20 мм рт. ст. Тепловое воздействие на органические материалы осуществляли путем нагревания в шахтной печи (9). Интенсивность оказываемого теплового воздействия соответствовала режиму пожара, рекомендованного МАГАТЭ для испытания материалов контейнеров, предназначенных для пере-

возки и хранения радиоактивных материалов (максимальная температура 800 °С) [17]. Образовавшуюся в результате нагревания газовую среду отбирали в приемник (10).

Газовые среды, образующиеся при контакте оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) с газообразными продуктами термодеструкции органических теплоизоляционных материалов, также получали с использованием представленной выше лабораторной установки. В этом случае перед нагреванием навеску применяемого оксида, также как древесину и пенопласт ЭТ-1, помещали в кварцевую пробирку (2). Далее эксперимент осуществляли по схеме описанной выше.

#### 3.2. Результаты газохроматографического анализа

Для оценки эффективности применения оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения содержания оксида углерода (II), метана и водорода в исследуемой газовой среде использовался метод газохроматографического анализа (ГХА). ГХА газовых сред на содержание указанных компонентов проводился на хроматографах «Цвет-560» и «ЛХМ» с детекторами по теплопроводности (катарометрами) по методикам, аттестованным метрологической службой РФЯЦ-ВНИИЭФ. Результаты анализа газовых сред представлены в табл. 2.

Данные ГХА, представленные в табл. 2, показывают, что при соотношении количества оксида меди (II) к убыли деструктурирующих материалов 0,11 моль/г (0,48 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) суммарное содержание оксида углерода (II), метана и водорода в газовой среде снизилось с 64,5 об. % до 13,5 об. %, то есть в 4,8 раза по отношению к исходной величине. Полученные результаты позволяют говорить о том, что применение оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) способствует снижению горючих компонентов в газовых средах, образующихся в результате термодеструкции органических теплоизоляционных материалов (древесины и пенопласта ЭТ-1).

Таблица 2

Результаты ГХА газовых сред

Оксид	Соотношение количества оксида к убыли деструктурирующих материалов		Содержание компонентов в газовой среде, об. %			
	моль/г	см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	водород	оксид углерода (II)	метан	сумма
Оксид меди (II)	0	0	27,4	27,8	9,3	64,5
	0,08	0,32	2,7	9,3	7,7	19,7
	0,11	0,48	1,5	7,1	4,9	13,5
Оксид молибдена (VI)	0	0	27,4	27,8	9,3	64,5
	0,02	0,22	4,2	25,5	6,7	36,4

Примечание. Убыль массы древесины в условиях эксперимента в результате процесса термодеструкции составила в среднем порядка 60 масс. %; при этом форма материала изменилась незначительно. Убыль массы пенопласта ЭТ-1 составила 99,9 масс. %. Относительная суммарная погрешность определения водорода, оксида углерода (II) и метана в газовой среде не превышает 8 %.

### 3.3. Результаты сравнительной оценки горючести

Учитывая то, что оксид углерода (II), метан и водород являются горючими газами [7], для оценки эффективности применения оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения содержания горючих компонентов в газовой среде наряду с ГХА в работе применялась сравнительная оценка горючести. Сущность данного метода заключается в определении минимального содержания газообразных продуктов термодеструкции в смеси с воздухом, при котором в условиях проведения эксперимента наблюдается распространение пламени по газовой смеси. Под условиями эксперимента подразумевается разогрев исследуемой газовой смеси в течение нескольких секунд до температуры порядка 1000 °С.

Возможность применения оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения содержания оксида углерода (II), метана и водорода в газовой среде оценивалось исходя из сравнения экспериментальных результатов, полученных при исследовании исходной газовой смеси и газовых сред после взаимодействия с оксидами меди и молибдена. Схема использованной при этом экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Сходная схема установки использовалась в работе [18] при исследовании концентрационных пределов распространения пламени газовых смесей на основе аммиака.

Перед проведением экспериментов работа представленной на рис. 3 установки была проверена на водороде и ацетилене. Полученные при этом экспериментальные результаты составили соответственно 4,0 об. % и 2,5 об. %, что согласуется со справочными данными (водород – 4,0 об. %, ацетилен –

2,5 об. %) [7]. На стадии подготовки к эксперименту в реакционном сосуде установки (3) создавали газовую смесь с заданным соотношением (газовая среда продуктов совместной термодеструкции органических теплоизоляционных материалов/воздух). Предварительно для этого в нем с помощью форвакуумного насоса (10) создавали разрежение равное 1 мм рт. ст. Затем поворотом трехходового крана (6) сосуд (3) заполняли исследуемой газовой средой из баллончика (9). Необходимое содержание газообразных продуктов термодеструкции в создаваемой газовой смеси устанавливали по показаниям ртутного манометра (8). При осуществлении эксперимента зажигание образовавшейся газовой смеси производилось от нихромовой электрической спирали (5), соединённой с электродами (4). Напряжение на электроды (4) подавалось от блока питания (1). Температура накала спирали составляла при этом порядка 1000 °С, время выхода на рабочую температуру – не более 4 с. Результаты эксперимента фиксировались визуально как явление отсутствия или наличия распространения пламени по исследуемой газовой смеси. Полученные в ходе экспериментов результаты представлены на рис. 4. Треугольниками на рисунке обозначено появление распространения пламени по газовой смеси, точками – его отсутствие.

Результаты, представленные на рис. 4, указывают на то, что применение оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения содержания оксида углерода (II), метана и водорода в газовой среде, образующейся в результате совместной термодеструкции древесины и пенопласта ЭТ-1, является перспективным. К примеру, если в отсутствие оксидов распространение пламени по газовой смеси в условиях проведения эксперимента наблюдалось при содержании 14,0 об. %

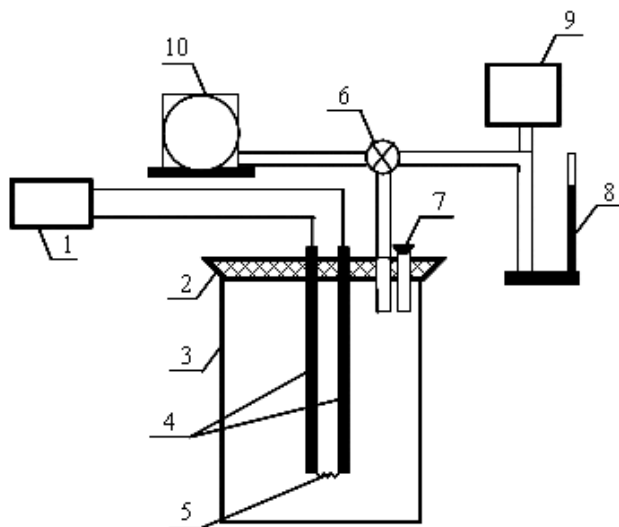


Рис. 3. Схема установки для оценки горючести газовых сред:

- 1 – блок питания; 2 – пробка; 3 – реакционный сосуд из термостойкого стекла; 4 – электроды; 5 – нихромовая спираль; 6 – трехходовой кран; 7 – встроенный клапан сброса давления; 8 – ртутный манометр; 9 – баллончик с исследуемой газовой средой; 10 – форвакуумный насос

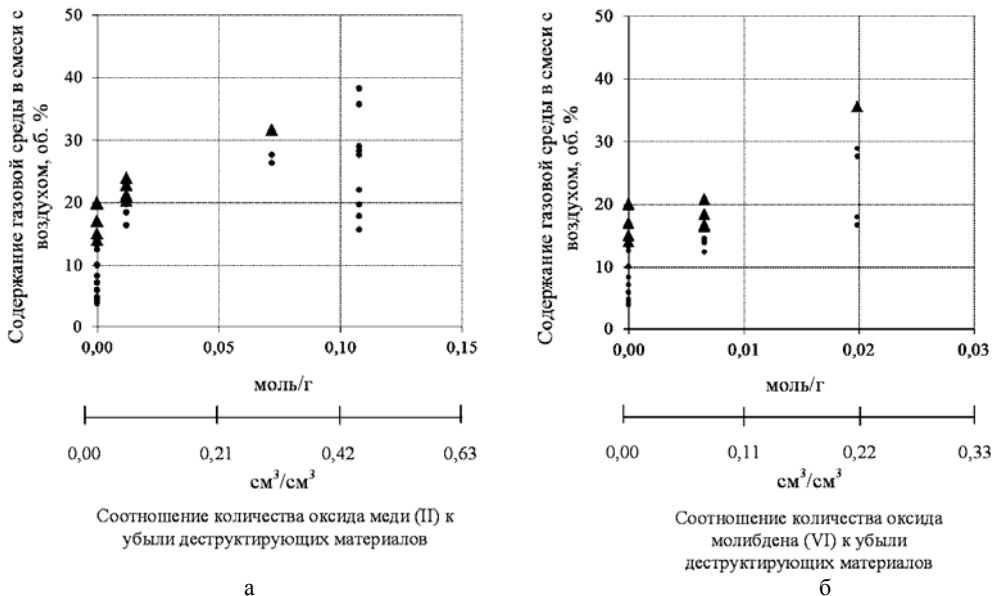


Рис. 4. Результаты сравнительной оценки горючести газовых сред:  
а – оксид меди (II); б – оксид молибдена (VI)

газообразных продуктов термодеструкции в воздухе, то при соотношении количества оксида меди (II) к убыли destructuring материалов равном 0,11 моль/г (или  $0,48 \text{ см}^3/0,48 \text{ см}^3$ ) отмеченный выше экспериментальный факт не наблюдался даже при содержании газообразных продуктов термодеструкции равном 38,2 об. %. Аналогичная тенденция наблюдается также и в случае применения оксида молибдена (VI).

#### 4. Заключение

Результаты проведенного в работе исследования показали, что применение оксида меди (II) и оксида молибдена (VI) в целях снижения пожаровзрывоопасности газовых сред, образующихся в результате совместной термодеструкции древесины, обработанной антипиреном, и пенопласта ЭТ-1, является перспективной мерой. Так, при соотношении количества оксида меди (II) к убыли теплоизоляционных материалов в результате термодеструкции равном 0,11 моль/г (или  $0,48 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) содержание оксида углерода (II), метана и водорода в газовой среде снизилось с 64,5 об. % до 13,5 об. %, то есть в 4,8 раза по отношению к исходной величине; а явление распространения пламени не наблюдалось даже при содержании газообразных продуктов термодеструкции в смеси с воздухом равном 38,2 об. %, что в 2,7 раза выше по сравнению с исходным значением. В случае применения оксида молибдена (VI) указанная тенденция сохраняется.

#### Литература

1. Иванов Г. Н. Тепловые свойства веществ: Справочная таблица. М.: ЦНИИАтоминформ, 1979.
2. Коршак В. В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров. М.: Наука, 1970.
3. Коршак В. В. Термостойкие полимеры. М.: Наука, 1969.

4. Коварская Б. М., Блюменфельд А. Б., Левантовская И. И. Термическая стабильность гетероцепных полимеров. М.: Химия, 1977.
5. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
6. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2.
7. Рябов И. В. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности: Справочник. М.: Химия, 1970.
8. Стёпин Б. Д., Цветков А. А. Неорганическая химия. М.: Высшая школа, 1994.
9. Некрасов В. В. Основы общей химии. М.: Химия, 1973. Т. 1.
10. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1991.
11. Григорьев А. К., Грохольский Б. П. Порошковая металлургия и применение композиционных материалов: Опыт внедрения. Ленинград: Лениздат, 1982.
12. Ключников Н. Г. Руководство по неорганическому синтезу. М.: Химия, 1965.
13. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия. М.: Высшая школа, 1999.
14. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Высшая школа, 1968.
15. Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. Ленинград: Химия, 1967.
16. Верятин У. Д., Маширев В. П., Рябцев Н. Г. и др. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник. М.: Атомиздат, 1965.
17. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и окружающей среды. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2005.
18. Шебеко Ю. Н., Трунев А. В., Цариченко С. Г. и др. Исследование концентрационных пределов распространения пламени газовых смесей на основе аммиака // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 5. С. 3–7

# РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ НА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЛАМПЫ

М. В. Назарова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время в условиях перехода к рыночным отношениям на предприятии бурно протекает процесс совершенствования форм и методов работы, в том числе в деятельности энергослужбы, которая обязана обеспечивать надежное, бесперебойное и безопасное снабжение производства всеми видами энергии и энергоносителей.

Таким образом, рационально организованная система освещения ведет к минимальным затратам в процессе эксплуатации. Так как затраты на электроэнергию составляют одну из ресурсоемких статей расходов, новый источник света, который представляет собой компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), является прекрасным выходом для уменьшения расходов на электроэнергию.

Основными техническими характеристиками КЛЛ являются:

- мощность и световой поток,
- температура света,
- срок службы,
- коэффициент цветопередачи.

## Мощность и световой поток

Для КЛЛ указывается потребляемая мощность и эквивалент по мощности обычной лампы накаливания (ЛН), выдающей равное с энергосберегающей количество света. Для энергосберегающих ламп мощность на упаковке следует умножить на 5. Среднестатистические значения мощности и соответствующего светового потока приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие мощности ламп и светового потока

Мощность КЛЛ, Вт	Мощность ЛН, Вт	Световой поток, Лм
5	25	250
8	40	400
12	60	630
15	75	900
20	100	1200
24	120	1500
30	150	1900

## Температура света

Производители люминесцентных ламп придерживаются таких температурных диапазонов:

2700 К – warm white – теплый белый, соответствует свету от обычной лампочки накаливания;

3300–3500 К – white – белый;

4000–4200 К – cool white – холодный белый, лампа светит со слабым голубым оттенком. Мощность рекомендуется выбирать больше, не ниже 20Вт. Так как с такой температурой света маломощная лампа светит тускло;

6000–6500 К – daylight – дневной. Свечение ламп соответствует люминесцентным трубкам большой мощности. Это самый оптимальный температурный режим, в случае если коэффициент цветопередачи  $R > 90$ .

Следует также отметить, что в зависимости от физиологии строения глаз, люди по-разному воспринимают температуру света, поэтому дневной свет многих раздражает.

## Срок службы

Производители дорогих энергосберегающих ламп (General Electric, OSRAM, Philips) гарантируют, что их продукция будет работать до 12000–15000 часов. Лампы из категории «подешевле» (Wolta, Nakai, Космос, Novigator) работают до 6000–10000 часов. Самый дешевый вариант (Zeon, Electrum, DeLuxe) имеет заявленную наработку в часах – 3000–4000 часов, что порой не соответствует действительности.

Зачастую брак определяется несовершенством производства, и большой процент дешевых ламп гаснет или начинает гореть тускло после 1000 часов работы.

Существуют определенные рекомендации по использованию энергосберегающих ламп, которые помогут продлить срок их службы.

Энергосберегающие лампы с плавным стартом предпочтительнее, так как такой вид включения дарит несколько тысяч часов работы. Первых пару минут лампа будет разогреваться, гореть не на полную мощность.

Нельзя использовать энергосберегающие лампы с устройствами плавного старта или защитными бло-



ками от скачков напряжения, которые используют с обычными лампами накаливания.

### Коэффициент цветопередачи

Чем выше коэффициент цветопередачи, тем лучше. Минимальное необходимое значение  $R = 82$ . Если коэффициент ниже, чем 82, то создается эффект затуманенности, тени от такого света получаются не четкие, оттенки предметов белого цвета – резкие с зеленоватыми или синими бликами. Глядя на лампочку с низким  $R$ , ловишь «зайчиков» в глазах, как от взгляда на сварку или на солнце.

### Сравнительный анализ ЛН и КЛЛ

Для анализа брались лампы накаливания наиболее применяемой мощности, т.е. от 40Вт до 250Вт.

1. Срок службы ЛН и КЛЛ на 8000 часов работы  
При условии работы: 249 рабочих дней в году, 8 часов в сутки.

Для ЛН, год:

$$\frac{1000}{249 \cdot 8} = 0,5,$$

где 1000 – срок службы ЛН, ч.

Для КЛЛ, год:

$$\frac{8000}{249 \cdot 8} = 4,$$

где 8000 – срок службы КЛЛ, ч.

Таким образом, за 4 года КЛЛ подлежат замене 1 раз, ЛН подлежат замене 8 раз.

2. Стоимость ламп:

$$C_{\Sigma Л} = \sum (N \cdot C), \quad (1)$$

где  $C_{\Sigma Л}$  – общая стоимость ламп, руб.;

$N$  – количество ламп, шт.;

$C$  – стоимость одной лампы, руб.

Для ЛН, руб.:

$$C_{\Sigma Л} = (278 \cdot 6 + 678 \cdot 6 + 289 \cdot 6 + 999 \cdot 12 + 296 \cdot 12 + 130 \cdot 20 + 53 \cdot 34) \cdot 8 = 27412 \cdot 8 = 219296.$$

Для КЛЛ, руб.:

$$C_{\Sigma Л} = 278 \cdot 112 + 678 \cdot 115 + 289 \cdot 117 + 999 \cdot 128 + 296 \cdot 161 + 130 \cdot 291 + 53 \cdot 400 = 377477.$$

3. Затраты на электроэнергию на 8000 часов работы:

$$C_{\Sigma Э/Э} = \sum (N \cdot P) \cdot C_{Э/Э} \cdot 8000, \quad (2)$$

где  $C_{\Sigma Э/Э}$  – общая стоимость электроэнергии, руб.;

$N$  – количество ламп, шт.;

$P$  – мощность одной лампы, руб.;

$C_{Э/Э}$  – стоимость электроэнергии за 1кВт\*ч, 1,03 руб.

Для ЛН, руб.:

$$C_{\Sigma Э/Э} = (278 \cdot 40 + 678 \cdot 60 + 289 \cdot 75 + 999 \cdot 100 + 296 \cdot 150 + 130 \cdot 200 + 53 \cdot 250) / 1000 \cdot 1,03 \cdot 8000 = 2117886.$$

Для КЛЛ, руб.:

$$C_{\Sigma Э/Э} = (278 \cdot 9 + 678 \cdot 13 + 289 \cdot 15 + 999 \cdot 20 + 296 \cdot 30130 \cdot 45 + 53 \cdot 55) / 1000 \cdot 1,03 \cdot 8000 = 438994.$$

4. Общие затраты:

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma Л} + C_{\Sigma Э/Э}, \quad (3)$$

где  $C_{\Sigma}$  – суммарные затраты на покупку ламп и оплату электроэнергии, руб.

Для ЛН, руб.:

$$C_{\Sigma ЛН} = 219296 + 2117886 = 2337182.$$

Для КЛЛ, руб.:

$$C_{\Sigma КЛЛ} = 377477 + 438994,24 = 816471.$$

5. Экономия при замене ЛН на КЛЛ на 8000 часов работы:

$$\Delta C_{\Sigma} = C_{\Sigma ЛН} - C_{\Sigma КЛЛ}, \quad (4)$$

где  $\Delta C_{\Sigma}$  – экономия денежных средств, руб.;

$$\Delta C_{\Sigma} = 2337182 - 816471,24 = 1520710.$$

6. Срок окупаемости КЛЛ:

$$T = \frac{\Delta C_{Л}}{\Delta P \cdot C_{Э/Э}}, \quad (5)$$

где  $T$  – срок окупаемости, ч.;

$\Delta C_{Л}$  – разность стоимости КЛЛ и ЛН, руб.;

$\Delta P$  – разность мощностей ЛН и КЛЛ, кВт;

$$T = \frac{377477 - 27412}{(257,025 - 53,276) \cdot 1,03} = 1668,08.$$

1668,08ч  $\approx$  208 рабочих дней (по 8 часов)  $\approx$  9,5 мес.

Таблица 2

Расходы на эксплуатацию ЛН и КЛЛ на 8000 часов работы

Затраты	1 год (2000 часов)		4 года (8000)	
	ЛН	КЛЛ	ЛН	КЛЛ
На лампы, руб.	54 824	377 477	219 296	377 477
На электроэнергию, руб.	529 471	109 748	2 117 886	438 994
Общие, руб.	584 295	487 225	2 337 182	816 471
Экономия, руб.		97 069		1 520 710

## Денежные затраты при постепенной замене ламп накаливания на энергосберегающие лампы

Год	Стоимость ламп, руб.		Затраты на э/э, руб.		Суммарные затраты, руб.
	ЛН	КЛЛ	ЛН	КЛЛ	
	54 824	0	529 471	0	584 295
1-й	14 940	234 558	151 358	77 507	478 364
2-й	0	142 919	0	109 748	252 667
3-й	0	0	0	109 748	109 748
4-й	0	0	0	109 748	109 748
Итого:	14 940	377 477	151 358	406 753	950 529

Уже в 1-ый год эксплуатации экономия составит 97 тыс. руб. Учитывая, что срок службы КЛЛ равняется 8000 часам, то за весь период эксплуатации экономия составит 1,5 млн. руб.

Согласно Федеральному закону «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», с 1 января 2011 г. к обороту на территории РФ не допускаются электрические лампы накаливания мощностью 100 Вт и более.

Таким образом, заменяя в 1-ый год ЛН мощностью только 100 Вт и более на КЛЛ, а во 2-ой год – все оставшиеся, расходы на эксплуатацию получаются следующие.

### Заключение

Из расчетов видно, что если все лампы заменять единовременно, то затраты на закупку КЛЛ составят

377 477 руб. Если же ЛН заменять на КЛЛ постепенно, то в 1-ый год вложения составят 234 558 руб.

После года службы КЛЛ сэкономленные денежные средства окупят 2/3 вложений (105 931 руб.) на закупку КЛЛ меньшей мощности.

Замена ламп накаливания на энергосберегающие лампы поможет использовать энергию более эффективно и снизить общую нагрузку на подстанциях.

В случае замены всех ламп на энергосберегающие мы освобождаем 203 кВт мощности и сокращаем почти в пять раз денежные расходы за энергопотребление от ламп накаливания. Таким образом, энергосбережение обходится дешевле, чем строительство и ввод в эксплуатацию новых энергетических мощностей.

# РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ НОДАЛИЗАЦИОННОЙ СХЕМЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ КОРСАР/ГП НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

*И. Г. Петкевич, Г. В. Алёхин*

ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск Московской обл.

## Введение

Для современных задач проектирования и обоснования безопасности реакторных установок (РУ) требуются многочисленные сложные расчеты. Для их реализации созданы и разрабатываются программные коды. Каждый из них имеет допустимый диапазон применения. Следуя правилам ядерной безопасности [1], программные средства, используемые при обосновании безопасности РУ необходимо аттестовать, то есть в принятом порядке подтвердить в надзорных органах возможность их применения в указанной области расчетов. Аттестация проводится в специально созданном для этого Совете по аттестации при «Научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности», включающем секцию № 2: «Расчеты теплопередачи и гидродинамики, связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты, моделирование нестационарных и аварийных процессов». Программный комплекс (ПК) КОРСАР/ГП, о котором пойдет речь в данной работе, принадлежит именно к этой области расчетов.

Для аттестации необходимо разработать верификационный отчет, в котором содержится информация об области применения программного средства. Однако после получения аттестационного паспорта, как правило, работы по верификации продолжают. Разработчик или пользователь заинтересованы в том, чтобы более точно определить допустимую область использования программы, погрешность расчета, найти «слабые» места кода, выявить направления для улучшения и модернизации кода, отладить код под решение конкретных задач.

ПК КОРСАР/ГП аттестован 23 сентября 2009 года [2]. Однако все еще является важным направлением работ отладка кода для решения задач, в которых большое значение имеют распределенные в пространстве реактора процессы, т. е. задачи, которые неточно решаются в одномерном приближении.

В данной работе рассматриваются две международные задачи, основанные на экспериментальных данных:

1. Задача V1000СТ-2: экспериментальные данные о закрытии быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) на паропроводе на малой мощности на 6-ом энергоблоке АЭС Козлодуй [3].

2. Задача об отключении 1-го из 4-х работающих главных циркуляционных насосов на 3-ем энергоблоке Калининской АЭС [4].

На основе этих задач код (файл входных данных) настраивается для моделирования 3-хмерных теплогидравлических процессов внутри реактора.

## Краткое описание ПК КОРСАР/ГП

ПК КОРСАР/ГП разработан и по сей день совершенствуется в НИТИ им. Александра, г. Сосновый бор. Некоторые модули написаны в ОКБ «Гидропресс» и включены в основной текст программы.

Главным образом ПК КОРСАР/ГП ориентирован на расчет теплогидравлических схем разного характера и на сопряженный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реакторных установок и блоков в целом. Кроме того, для реакторных задач возможно также подключение расчета термомеханики твэла и перемешивания теплоносителя в напорной камере реактора с помощью специального элемента «Камера» (расчет перемешивания возможен и без него).

Теплогидравлический расчет в ПК КОРСАР/ГП проводится в одномерном приближении на основе двухжидкостной полностью неравновесной модели с равными давлениями фаз. Конечно-разностная аппроксимация уравнений сохранения построена на следующих принципах. В основе пространственной дискретизации лежит метод контрольных объемов. Для временной аппроксимации выбрана полуневьяная схема. При этом для исключения итераций при численном решении неявные члены линеаризуются. Линеаризация приводит к дисбалансам масс и энергии, которые вычисляются на одном временном слое и учитываются как источники в следующем.

Для нейтронно-физического расчета используется трехмерное диффузионное приближение с 2-мя энергетическими группами и 6-ю группами запаздывающих нейтронов. Возможно применение двух конечно-разностных схем. Первая является «классической» схемой, вторая – метод коррекции коэффициентов диффузии (метод Аскью-Такеда). Обычно в плане для гексагональных тепловыделяющих сборок (ТВС) используется по 6 расчетных узлов на одну сборку (в общем случае возможно использование

расчетных схем с 1, 6 и 24 расчетными узлами на гексагональную ячейку кассеты).

Распределение нейтронов в активной зоне зависит от параметров, называемых параметрами обратных связей. Для расчетов по ПК КОРСАР/ГП обычно в качестве параметров обратных связей выбирают температуру топлива, плотность теплоносителя и концентрацию борной кислоты в теплоносителе (в граммах борной кислоты на килограмм теплоносителя). Также вид нейтронного поля зависит от положения стержней регулирования и защиты, выгорания, концентрации ксенона-135 и самария-149. Вообще говоря, оказывают влияние и другие параметры, например, выгорание стержней управления и защиты, плотность конструкционных материалов, но это влияние слабое, и им пренебрегают.

Нейтронное поле в КОРСАР/ГП не рассчитывается непосредственно по значениям параметров обратных связей. В нейтронно-физических уравнениях фигурируют так называемые макроскопические сечения и другие параметры, все вместе их часто называют макросечениями. Через макросечения осуществляется в расчете связь между параметрами обратных связей и нейтронным полем (рис. 1).

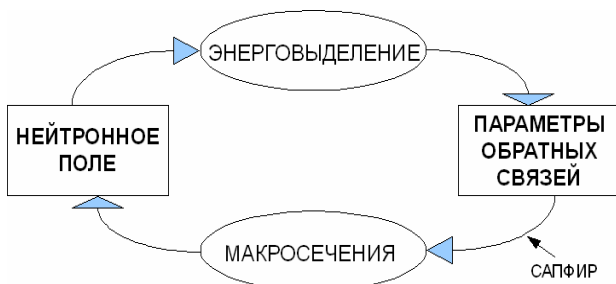


Рис. 1. Обратная связь

Зависимость макросечений от параметров обратных связей в ПК КОРСАР/ГП задается в виде заранее определенных многомерных таблиц. В ячейках таблиц находятся значения макросечений для узловых значений параметров обратных связей. Между узлами значения макросечений интерполируются с помощью степенных многочленов.

Для данной работы таблицы макросечений были получены с помощью программного комплекса САПФИР\_95&RC\_ВВЭР, также написанного в НИТИ им. Александрова [5].

### Нодализационная схема

Для расчета теплогидравлических установок в ПК КОРСАР/ГП, как и в других кодах такого рода, необходимо описать установку в виде схемы расчетных элементов, называемой нодализационной схемой. Эти элементы представляют собой математические модели отдельных частей установок – труб, стенок труб и различных объемов, теплообменников, гидравлических сопротивлений, тепловыделяющих элементов и прочего. Часто расчетные элементы являются значительным упрощением реальных объек-

тов. Возможны ситуации, когда используемым расчетным элементам нельзя поставить в соответствие реальные объекты установки (например, сопротивление, возникающее от изменения профиля потока в трубе). И наоборот, реальные объекты не всегда отражены в нодализационной схеме для упрощения и ускорения расчета. От того, как составлена нодализационная схема, в значительной степени зависит результат расчета. Основная задача данной работы – это построение и отладка разветвленной нодализационной схемы реактора ВВЭР-1000.

Главным расчетным элементом в ПК КОРСАР/ГП является канал. Вся гидравлическая часть описывается в основном каналами и вспомогательными элементами. Канал состоит из расчетных объемов, называемых ячейками. Канал – одномерный элемент (если в нем более одной ячейки), в то время как ячейка – точечный элемент (не имеет измерений). Одной из важных характеристик нодализационной схемы является количество контрольных объемов, то есть ячеек. Схема с большим количеством ячеек более подробно описывает реальную установку. Однако использование слишком большого числа ячеек, их измельчение может оказаться некорректным. Большое влияние также оказывают расположение ячеек, их геометрическая ориентация и связи между ними.

### Реакторная установка с реактором типа ВВЭР-1000

Реакторные установки 3-го блока Калининской АЭС и 6-го блока АЭС Козлодуй практически одинаковы (проект В-320). Поэтому для обеих задач, рассмотренных в работе, используется одна и та же нодализационная схема реактора.

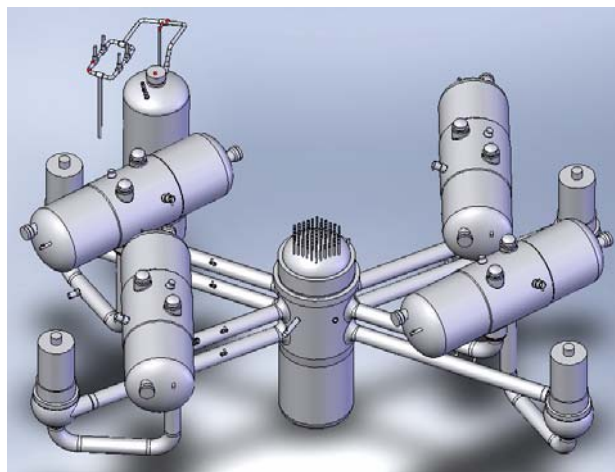


Рис. 2. Реакторная установка

Реакторная установка состоит из реактора, 4-х парогенераторов, 4-х главных циркуляционных насосов (ГЦН), компенсатора давления и главного циркуляционного трубопровода, образующего 4 петли (рис. 2). Теплоноситель после активной зоны выхо-

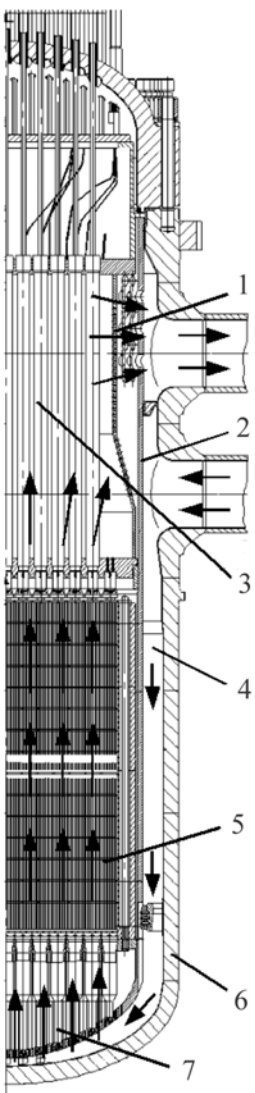


Рис. 3. Реактор

дит из реактора через «горячие» патрубки в трубопровод (верхняя часть, короткий участок). По трубопроводу он подается в парогенератор, где передает тепло теплоносителю второго контура. Охлажденный теплоноситель первого контура выходит из парогенератора и по трубопроводу (нижняя часть, длинный участок) через ГЦН поступает обратно в реактор. Теплоноситель второго контура (вода) кипит, выходит из парогенератора и подается по паропроводам на турбину. На каждом паропроводе установлен БЗОК.

Направление течения теплоносителя в реакторе, внутрикорпусные устройства и камеры реактора схематично изображены на рис. 3.

Теплоноситель из четырех петель, поступаая через четыре «холодных» патрубка, попадает в опускной участок (поз. 4) напорной камеры, имеющий форму кольца (кольцевой зазор между шахтой 2 и корпусом 6). В нем он опускается до подъемного участка напорной камеры (поз. 7).

В напорной камере теплоноситель из разных петель частично перемешивается. Из напорной камеры теплоноситель подается в активную зону (поз. 5), омывая ее, нагревается и по-

дает в сборную камеру (поз. 3). Сборная камера в основном представляет собой пространство между трубами диаметром 108 и 180 мм в блоке защитных труб (БЗТ, поз. 1). В сборной камере теплоноситель также частично перемешивается и выходит из реактора через четыре «горячих» патрубка, расположенных строго над «холодными».

Большая часть задач для обоснования безопасности не требует моделирования перемешивания теплоносителя в реакторе и моделирования нейтронного поля в 3-мерном приближении. Однако часть задач при таком подходе считается плохо. Для них необходимо указанное моделирование. Теплогидравлический расчет в ПК КОРСАР/ГП является одномерным. Возникает нетривиальная задача моделировать сложные 3-мерные теплогидравлические процессы одномерным кодом. Для этого необходимо составить разветвленную нодализационную схему из одномерных элементов (каналов), связанных между собой, отладить и проверить ее с помощью экспериментальных данных. Этой задаче и посвящена данная работа.

### Напорная камера реактора

Нодализационная схема напорной камеры настраивалась на основе экспериментальных данных, содержащихся в спецификации к международной тестовой задаче V1000СТ-2 о разрыве паропровода. Эти данные получены из испытаний по закрытию БЗОК на 6-м энергоблоке АЭС Козлодуй на малой мощности. В ПК КОРСАР/ГП моделировались только «холодные» патрубки реактора и напорная камера. При таком подходе один расчет занимал немного времени, и была возможность решить оптимизационную задачу по наладке схемы.

Нодализационная схема (рис. 4) состоит из 4-х горизонтальных каналов для патрубков, 42-х вертикальных каналов для опускного участка и 163-х каналов (по числу тепловыделяющих сборок) для подъемного участка – всего 749 ячеек. Ячейки соседних каналов связаны друг с другом.

Закрытием БЗОК парогенератор 1-й петли был

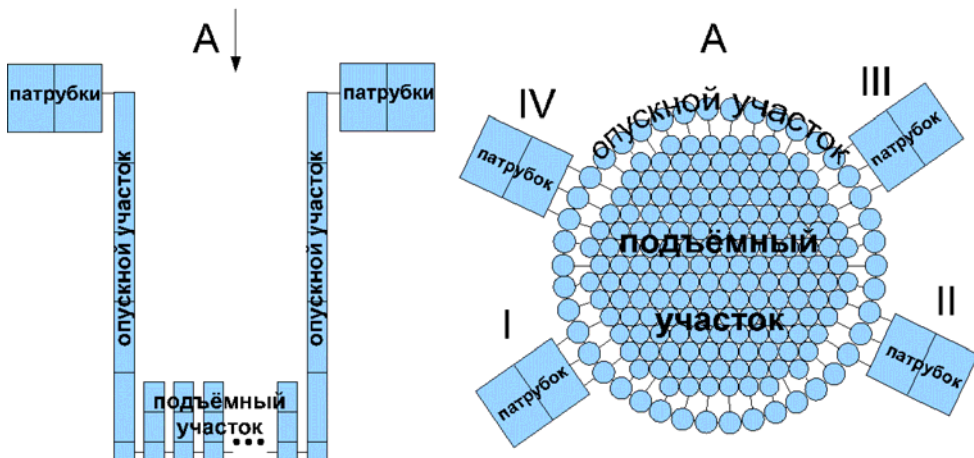


Рис. 4. Нодализационная схема напорной камеры

отсечен от турбины. Также была прекращена подача питательной воды в парогенератор. Тепло в 1-й петле перестало отводиться от первого контура. Поэтому теплоноситель 1-й петли нагрелся на  $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в «холодном» участке). Более теплый теплоноситель, частично смешиваясь с теплоносителем других петель в напорной камере, поступал в активную зону. Температурные датчики регистрировали распределение температуры в активной зоне (в тепловыделяющих сборках). Таким образом, на основе этого эксперимента можно проверить и отладить моделирование течения и перемешивания теплоносителя в напорной камере.

При анализе полученных данных был выявлен эффект закручивания теплоносителя в напорной камере. Он заключается во вращении потока теплоносителя относительно вертикальной оси, проходящей через центр реактора. Этот эффект моделировался в ПК КОРСАР/ГП с помощью вспомогательных элементов нодализационной схемы типа «местное сопротивление», не соответствующих реальным объектам. Элементы «местное сопротивление» были таким образом распределены по опускному участку, чтобы в расчете создавался эффект закручивания. Для всех элементов задавалось одно и то же значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\alpha$ .

Для регулирования интенсивности перемешивания в ПК КОРСАР/ГП используется элемент «турбулентное перемешивание». Этим элементом связываются ячейки соседних каналов, между которыми рассчитывается обмен различными субстанциями. Математическая модель элемента очень проста: интенсивность перемешивания (расход субстанций) линейно зависит от расхода теплоносителя в канале. В соотношении используется коэффициент  $\beta$ , характеризующий интенсивность турбулентного перемешивания, который задается пользователем.

Была поставлена задача оптимизации (поиска минимума) среднеквадратичного отклонения расчетных температур теплоносителя в тепловыделяющих сборках от экспериментальных. В эксперименте регистрировались значения температур для 96 тепловыделяющихборок с погрешностью порядка  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Управляющими параметрами в задаче являлись коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Для решения применялся метод наискорейшего градиентного спуска [6].

В результате были получены значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых среднеквадратичное отклонение расчетных температур от экспериментальных составило  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальное отклонение –  $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При полученных значениях управляющих параметров почти все значения расчетных температур совпадают с экспериментальными в области погрешности.

Область применения полученного значения параметра  $\beta$  для реакторных установок должна быть выявлена на основе других полученных в экспериментах и испытаниях на блоках данных, на основе которых можно было бы судить о перемешивании теплоносителя в камерах реактора. Испытания и экс-

перименты должны быть проведены в различных режимах работы реакторной установки: при работе разного числа петель, при разных температурах теплоносителя и т. д. Тогда для этих режимов и подобных им станет возможным вычисление коэффициента  $\beta$ , как это и было сделано в рамках данной работы.

Полученное значение коэффициента  $\alpha$  можно применять только для рассмотренной реакторной установки (6-ой энергоблок АЭС Козлодуй), поскольку эффект закручивания потока различается даже для реакторных установок одного проекта. Коэффициент  $\alpha$  может применяться только в задачах с похожими условиями (расход теплоносителя, работа всех 4-х ГЦН, отсутствие паровой фазы).

### Сборная камера реактора

Сборная камера реактора состоит из блока защитных труб, пространства над ним (под крышкой реактора), кольцевого зазора между шахтой и корпусом и патрубков. Нодализационная схема (рис. 5) состоит из следующих частей:

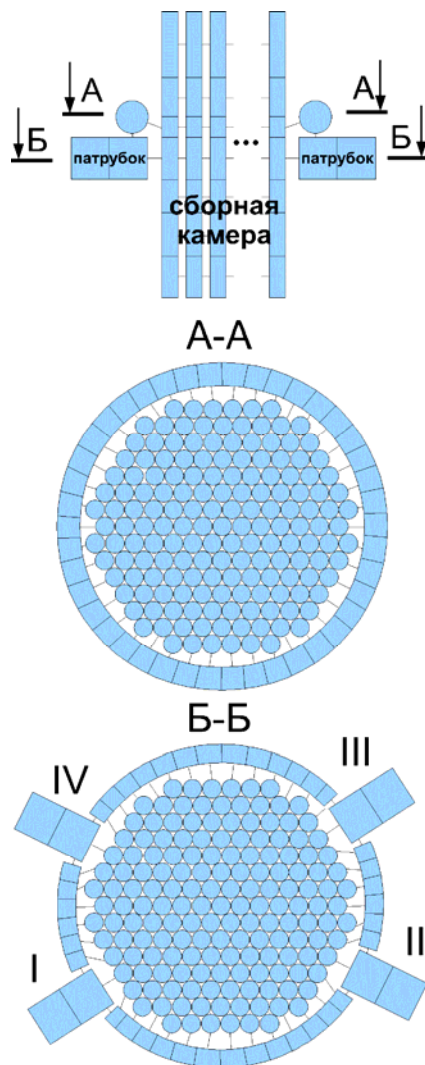


Рис. 5. Нодализационная схема сборной камеры



– 163 вертикальных канала для блока защитных труб и пространства над ним;

– 4 горизонтальных канала для нижней части (около патрубков) пространства между шахтой и корпусом (каналы расположены от патрубка до патрубка);

– 1 горизонтальный кольцевой канал для верхней части пространства между шахтой и корпусом;

– 4 горизонтальных канала для патрубков.

Всего 1229 ячеек.

Кроме того, в нодализационной схеме были использованы элементы типа «местное сопротивление» для моделирования сопротивления плитами и обечайками внутрикорпусных устройств (трубы, обечайка и все плиты блока защитных труб, обечайка шахты). Поскольку распределение параметров теплоносителя (расходы, температуры) в сборной камере не описывается в одномерном приближении, то значения коэффициентов гидравлического сопротивления имеют условный характер.

Отладка схемы произведена на основе эксперимента на 3-м энергоблоке Калининской АЭС по отключению одного главного циркуляционного насоса из четырех работающих. Эксперимент был проведен 2 октября 2005 года. В момент отключения ГЦН параметры реакторной установки соответствовали номинальным.

Отключенный насос не останавливается сразу после прекращения подачи на него питания. В целях сохранения в течение некоторого времени расхода теплоносителя первого контура на ГЦН установлен маховик. Поэтому после отключения питания начинается выбег насоса. Постепенно расход в петле с отключенным ГЦН уменьшается до нуля (примерно за 20–25 с), а затем наступает обратный ток, то есть теплоноситель течет в обратную сторону под действием оставшихся в работе ГЦН. В петле устанавливается постоянный отрицательный расход. В соответствии с регламентом эксплуатация реакторной установки с 3-мя работающими ГЦН возможна на мощности не более 67 % от номинальной. Поэтому, в переходном процессе включается регулятор ограничения мощности и снижает мощность до 67 % путем частичного введения 10-й и 9-й групп стержней управления и защиты.

Итак, после отключения ГЦН 1-ой петли в ней начался обратный ток теплоносителя. Теплоноситель из смежных петель (2-й и 4-й) в опускном участке частично поступал в первую петлю. Затем, после прохождения парогенератора, охлажденный теплоноситель 1-й петли попадал в сборную камеру реактора через «горячий» патрубок. В сборной камере он распределялся по другим петлям, оказывая влияние на их температуры в той мере, в какой он в них попадал. Больше влияние теплоноситель 1-й петли оказывал на 4-ю петлю, поскольку патрубок 4-й петли расположен ближе других к патрубку 1-й петли. Можно сделать вывод, что процесс характеризуется сложным процессом перемешивания теплоносителя в сборной камере.

Для получения граничных условий на входе в сборную камеру решалась задача для реактора в целом с граничными условиями на его патрубках, взятыми из эксперимента. При решении этой вспомогательной задачи был использован ранее найденный коэффициент  $\beta$  для турбулентного перемешивания в опускном участке и напорной камере (см. выше). Закручивание потока не моделировалось.

Отладка схемы состояла в выборе значений коэффициентов гидравлического сопротивления. Всего рассматривалось 3 коэффициента для элементов типа «местное сопротивление», моделирующих сопротивление следующих реальных объектов: труб БЗТ, обечайки БЗТ, обечайки шахты, и 1 коэффициент для длинных элементов типа «канал», связывающих патрубки в нижней части пространства между шахтой и корпусом. Последний коэффициент условный, поскольку не соответствует реальному объекту. Он требуется для того, чтобы отрегулировать соотношение расходов теплоносителя от петли с обратным током к ближнему и дальнему патрубкам вдоль пространства между шахтой и корпусом.

Отладка схемы производилась по отклонениям расчетных температур теплоносителя в «горячих» участках петель с прямым током от экспериментальных. Поставить оптимизационную задачу, как в предыдущей ситуации, не удалось из-за неподходящей зависимости этих температур от коэффициентов сопротивления. Оказалось, что с возрастанием от нуля каждого коэффициента после некоторого значения расчетные температуры почти перестают меняться, выходят на «плато». Значения расчетных температур на «плато» и экспериментальных приведены в таблице 1. Отклонение расчетных температур от экспериментальных не превышает 1,3 °С. Погрешность измерений составила около 2 °С, так что расчетные и экспериментальные значения совпадают в области погрешности.

Таблица 1  
Температура теплоносителя в «горячих» участках петель

Петля	Экспериментальное значение, °С	Расчетное значение, °С	Отклонение, °С
1	277,0	277,0 (граничное условие)	–
2	311,3 – 311,9	310,4	1,3
3	313,1 – 313,7	312,7	0,7
4	303,2 – 305,1	305,0	0,7
Среднеквадратичное отклонение по 3-м петлям			0,9

Поскольку расчетные температуры не зависят от коэффициентов при их значениях больше пороговых, в настоящих расчетах эти значения выбираются исходя из перепадов давлений в номинальном режиме. При этом ведется контроль, чтобы значения не были меньше пороговых.



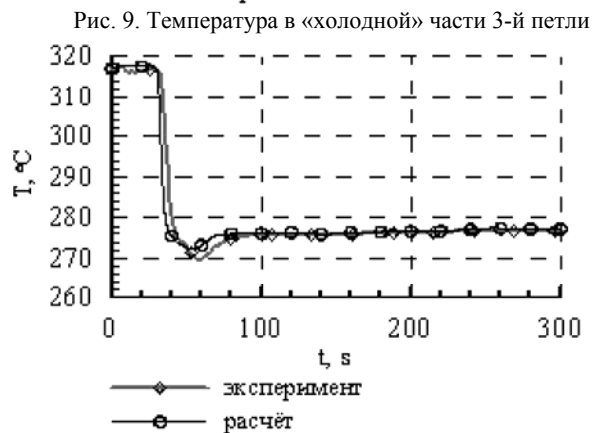
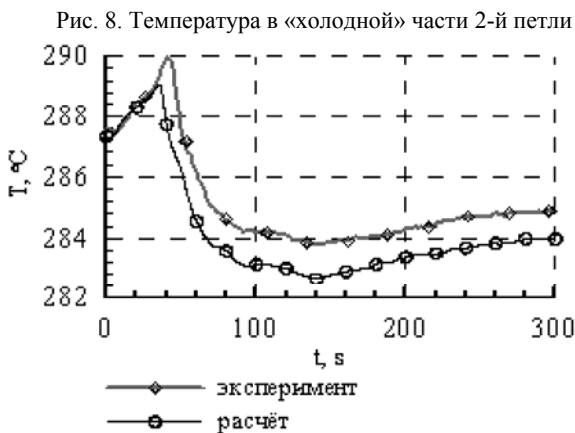
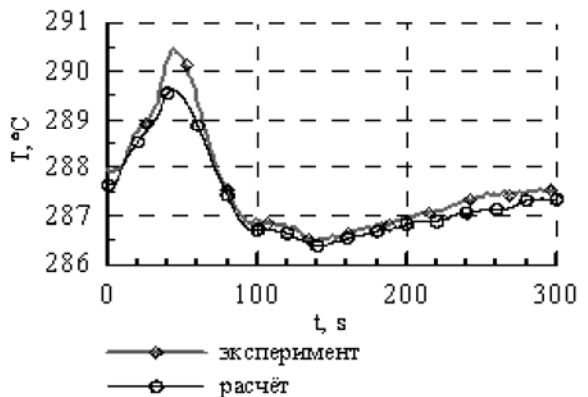
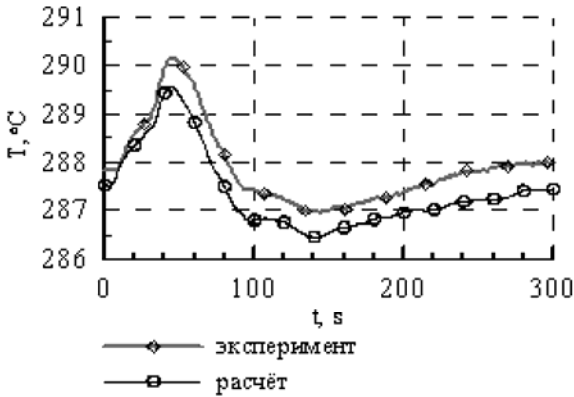
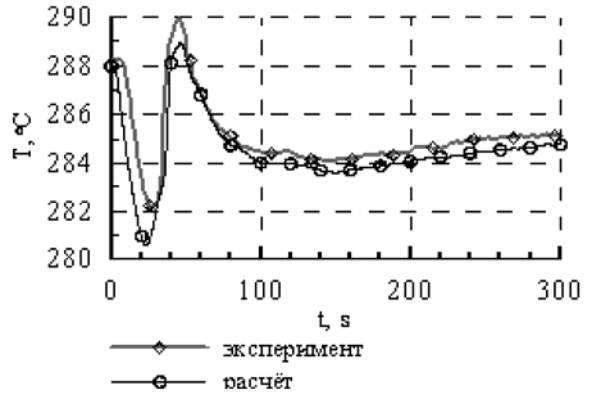
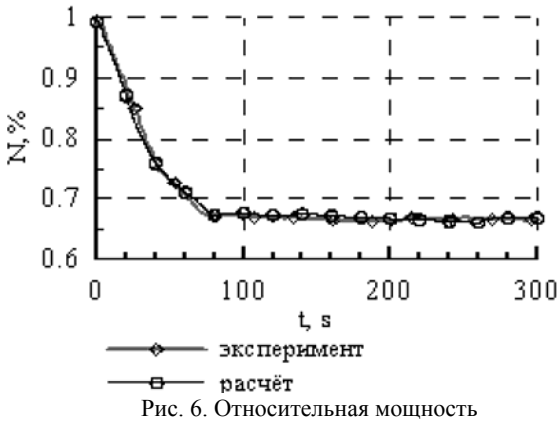
## Решение задачи об отключении одного ГЦН из 4-х работающих с моделированием 1-го контура

Оптимизированная нодализационная схема реактора в составе схемы реакторной установки (первого контура) была использована при решении задачи об отключении одного главного циркуляционного насоса из четырех работающих на 3-м энергоблоке Калининской АЭС (см. выше). При этом моделировалось не только стационарное состояние, но и переходный процесс.

При моделировании приняты граничные условия на парогенераторах по температуре питательной воды и уровню. Последнее из них было реализовано в виде расхода питательной воды для установления заданного уровня.

На рис. 6 построен график изменения тепловой мощности реактора. Экспериментальный и расчетный графики хорошо согласуются между собой.

На рис. 7–14 изображены экспериментальные и расчетные графики температур в петлях. Погрешность измерения термодатчиков около  $2^\circ\text{C}$ . Расчетные значения температур представлены для мест расположения термодатчиков. Можно отметить, что в целом температура 1-го контура в расчете оказалась ниже, чем в эксперименте. Скорее всего, это связано с несовершенством модели парогенератора в точечном приближении. Возможно, при использовании более сложной модели (например, при моделировании парогенераторов элементами типа «канал») результаты расчета будут ближе к экспериментальным. В целом, расчетные графики хорошо согласуются с экспериментальными.



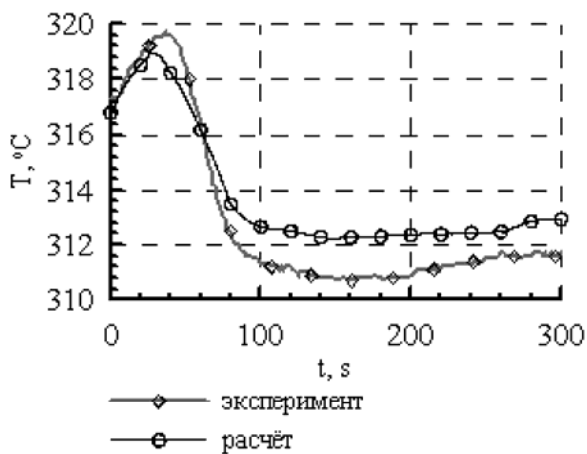


Рис. 12. Температура в «горячей» части 2-й петли

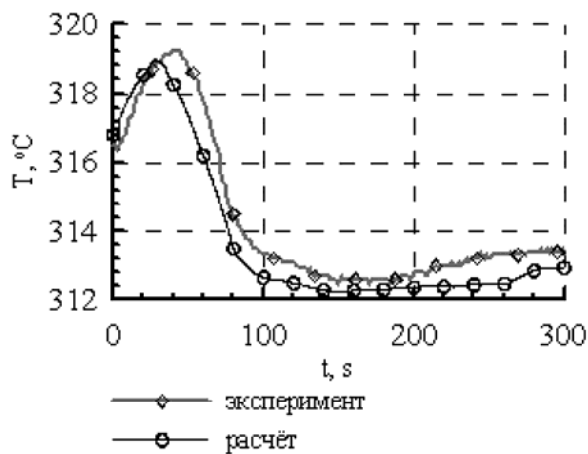


Рис. 13. Температура в «горячей» части 3-й петли

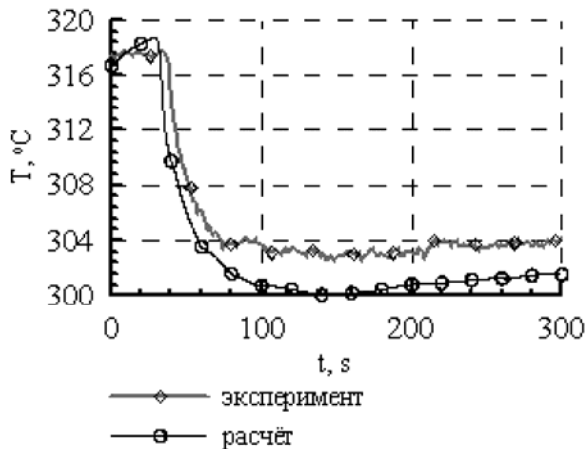


Рис. 14. Температура в «горячей» части 4-й петли

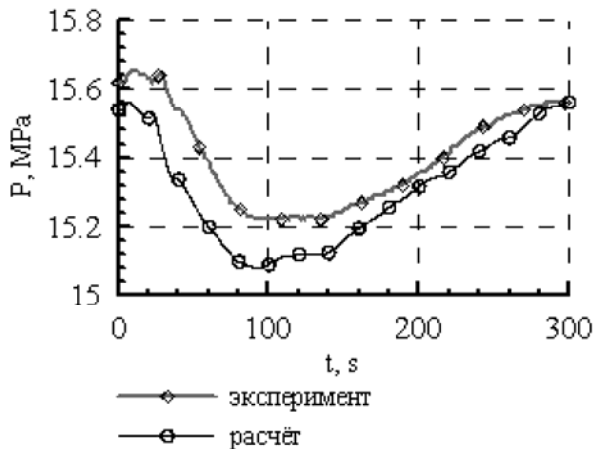


Рис. 15. Абсолютное давление над активной зоной

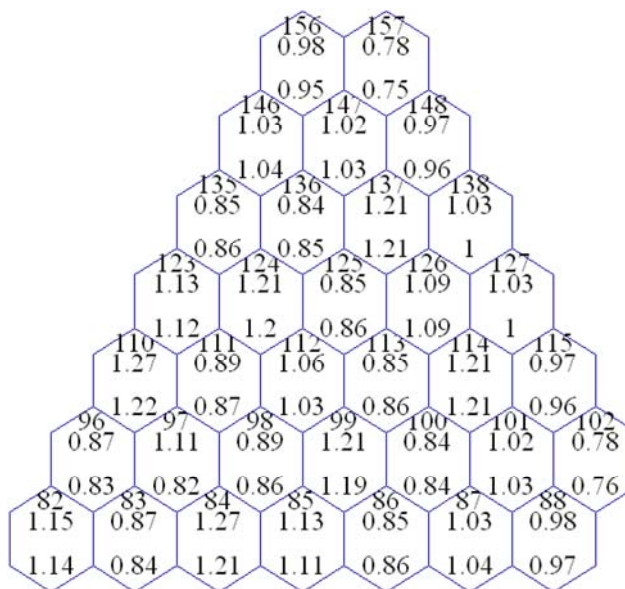


Рис. 16. Относительное энерговыделение в ТВС до переходного процесса в секторе активной зоны (сверху вычисленные значения, снизу – экспериментальные)

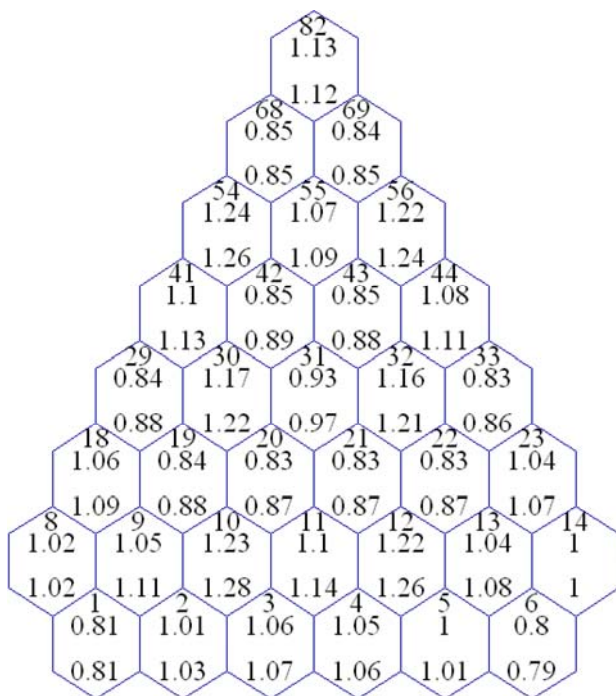


Рис. 17. Относительное энерговыделение в ТВС после переходного процесса в секторе активной зоны (сверху вычисленные значения, снизу – экспериментальные)

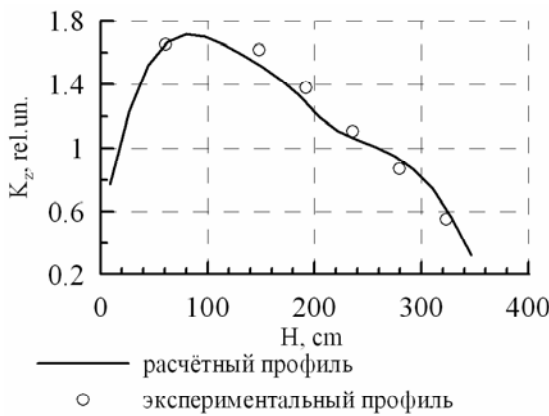


Рис. 18. Профиль энерговыделения в ТВС № 65

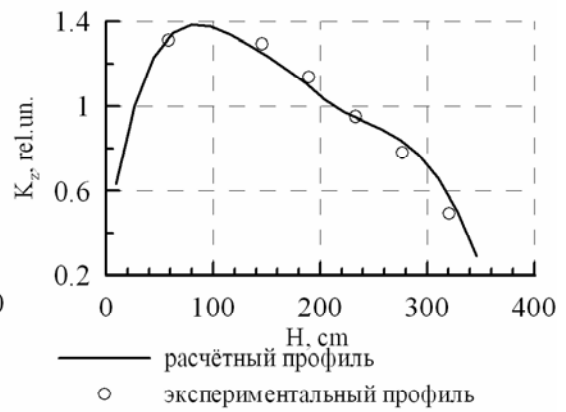


Рис. 19. Высотный профиль энерговыделения в активной зоне

На рис. 15 представлен график абсолютного давления над активной зоной. Расчетный и экспериментальный графики удовлетворительно согласуются.

На рис. 16–17 изображены картограммы относительного энерговыделения в тепловыделяющих сборках. Различие между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 6 %, кроме ТВС № 97. ТВС № 97 была внепланово заменена в ходе эксплуатации, что не было учтено в расчете. Данное допущение слабо отражается на других параметрах. Экспериментальный и расчетный высотные профили энерговыделения также хорошо согласуются между собой (рис. 18–19).

Результаты расчетов показывают, что нодализационная схема составлена корректно и удовлетворительно моделирует реактор.

### Заключение

Данная работа посвящена разработке и проверке нодализационной схемы, описывающей реактор типа ВВЭР-1000. Построенная схема содержит более 5,5 тыс. контрольных объемов.

Проведены наладка и испытание нодализационной схемы с помощью двух международных задач, основанных на экспериментальных данных с 3-го энергоблока Калининской АЭС и с 6-го энергоблока АЭС «Козлодуй». Первая из задач была решена также с моделированием всего первого контура. Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных обосновывает применимость нодализационной схемы к подобным расчетам.

Разработан способ для моделирования эффекта закручивания потока в опускном участке реактора. В рамках этого способа модель должна подстраиваться

под конкретную установку по экспериментальным данным.

Разработанная нодализационная схема позволяет моделировать перемешивание теплоносителя в напорной и сборной камерах реактора. В настоящее время работы по верификации схемы в части выявления области ее применения и погрешности расчетов продолжаются.

### Литература

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, НП-082-07.
2. Программный комплекс КОРСАР/ГПИ, аттестационный паспорт программного средства № 263 от 23.09.2009, НТЦ ЯРБ.
3. Kolev N., Aniel S., Royer E., Bieder U., Popov D., Topalov Ts. VVER-1000 Coolant Transient Benchmark (V1000CT) // Volume II: «Specifications of the VVER-1000 Vessel Mixing Problems», OECD Nuclear Energy Agency, 2004.
4. Терешонок В. А., Степанов В. С., Ивченков В. В., Питилимов В. А., Никонов С. П. Описание переходного динамического процесса, обусловленного отключением одного из четырех работающих ГЦН на номинальной мощности блока № 3 Калининской АЭС.
5. Artyomov V. G., Elshin A. V., Ivanov A. S. et al. Development of neutron-physics models of varies types of reactors on the basis of unified algorithms of applied code package SAPFIR // Proceedings of the 10-th International Seminar on Reactor Physics, Moscow, 2–6 September, 1997.
6. Боглаев Ю. П. Вычислительная математика и программирование: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1990.

# МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В. А. Платонов, Р. В. Баранов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Одним из этапов проектирования современной электронной аппаратуры является компьютерное моделирование поведения приборов в заданных условиях эксплуатации. Достоверность результатов зависит от адекватности модели и правильности проведения этапов моделирования. Поэтому для получения достоверных результатов моделирования необходимо определенным и отработанным набор действий.

Работа посвящена созданию методики компьютерного моделирования конструкций электронных приборов. Данная методика позволяет моделировать поведение конструкций приборов в условиях механических нагрузок и получать отклик (перемещения, ускорения, АЧХ) любой точки конструкции прибора.

## 1. Разделы методики

Основными разделами методики являются:

- 1) разработка модели исследуемого прибора;
- 2) препроцессинг модели исследуемого прибора (подготовки к моделированию);
- 3) постпроцессинг (проведение анализа результатов моделирования).

## 2. Разработка модели исследуемого прибора

При разработке трехмерной модели исследуемого объекта для моделирования в системе инженерного анализа (СИА) необходимо обеспечить соответствие компонентов модели компонентам реальной конструкции по массогабаритным параметрам и прочностным характеристикам, а также максимально упростить модель для уменьшения трудозатрат на ее создание.

Первоначально определяются основные компоненты модели. Обычно это основание, крышка или кожух, печатные платы, внешние разъемы. Данные компоненты включаются в создаваемую модель. При построении моделей необходимо исключать незначительные скругления, фаски, отверстия и пр.

После определения основных компонентов определяется состав электронных блоков. Электрорадиоизделия (ЭРИ), входящие в каждый электронный блок, можно разделить на две группы:

1) ЭРИ с массой, сравнимой с массой платы. Такие ЭРИ будут оказывать влияние на форму колебаний электронного блока;

2) ЭРИ с массой, много меньшей массы платы.

Для определения ЭРИ первой группы необходимо использовать следующие критерии:

1) ЭРИ с массой

$$m_{\text{эри}} \geq \frac{m_{\text{плл}}}{10}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{плл}}$  – масса печатной платы, кг.

2) ЭРИ, установленные в два этажа, считать сосредоточенной массой. Вычислить суммарную массу данных ЭРИ и произвести проверку на соответствие условию (1). При положительном результате сравнения создать компонент с массой и объемом, примерно равным сумме объемов выбранных ЭРИ. Данный критерий можно применить не только для установленных в два этажа ЭРИ, но и для сосредоточенных на плате ЭРИ, установленных рядом друг с другом.

ЭРИ, удовлетворяющие вышеперечисленным критериям, включить в модель исследуемого объекта в виде самостоятельных компонентов. При создании моделей ЭРИ необходимо исключать выводы и различные контакты.

Остальные ЭРИ отнести ко второй группе. В этом случае рассматриваются две ситуации. Первая ситуация: если в конструкции прибора используется пблочная заливка (пенопласт), масса ЭРИ второй группы  $m_{\text{искл.эри}}$  распределяется по массе этой заливки, то есть

$$m_{\text{зал}} = m_{\text{зал.исх}} + m_{\text{искл.эри}}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{зал}}$  – масса заливки исходная (рассчитанная либо по конструкторской документации, либо по предварительной электронной модели), кг.

Таким образом, в состав моделей электронных блоков необходимо включить компоненты заливки с объемом, установленным конструкторской документацией (КД) или соответствующим предварительной электронной модели, и массой  $m_{\text{зал}}$  или  $m_{1\text{зал}}$  и  $m_{2\text{зал}}$ .

Вторая ситуация: если в конструкции прибора используется общая заливка блоков (установленных в корпус) или заливка не используется вообще, то массу ЭРИ второй группы необходимо включить в массу печатной платы, на которую должны устанавливаться данные ЭРИ.

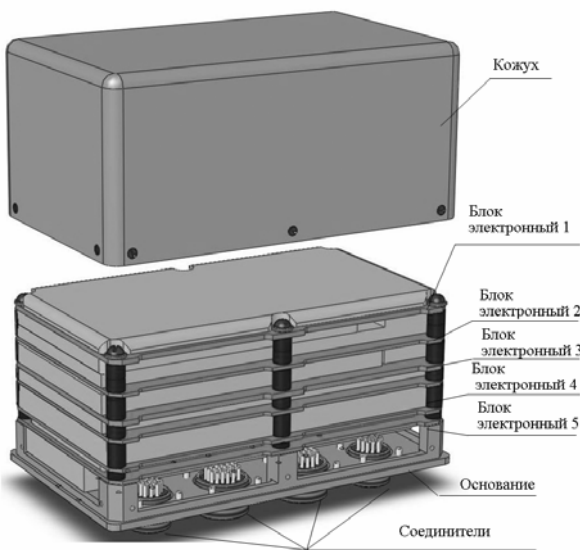


Рис. 1. Конструкция прибора

Рассмотрим пример создания модели реального прибора. Конструкция данного прибора представлена на рис. 1.

Каждый из блоков, представленных на рис. 1, имеет в своем составе различные пассивные и активные ЭРИ. В некоторых блоках ЭРИ устанавливаются в два этажа (резисторы над резисторами, резисторы над транзисторными матрицами). Блоки заливаются пенопластом ППУ-305А (на рис. 1 изображен желтым цветом) каждый отдельно, затем собираются в единую конструкцию и крепятся к основанию шестью винтами. В модель конструкции данного прибора включены следующие основные компоненты: основание, печатные платы, внешние соединители, втулки. Создание модели электронного блока рассмотрим на примере электронного блока 2. Фрагмент сборочного чертежа данного блока показан на рис. 2, созданная модель – на рис. 3.

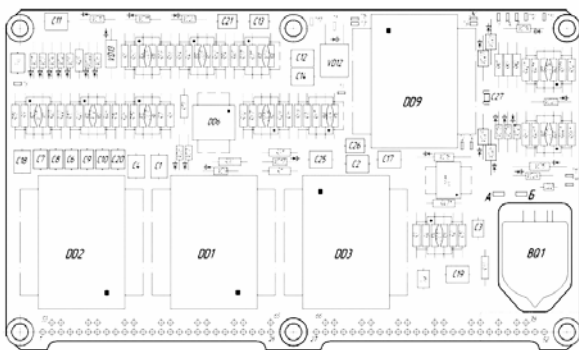


Рис. 2. Фрагмент сборочного чертежа электронного блока 2

Модель конструкции всего прибора представлена на рис. 4 (заливка показана прозрачной).

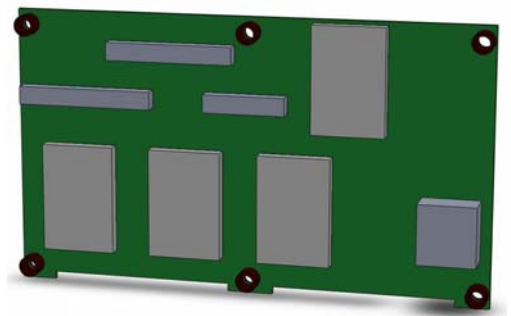


Рис. 3. Модель электронного блока 2

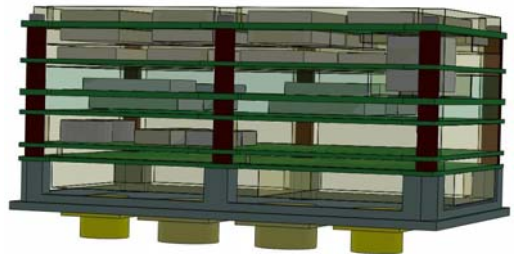


Рис. 4. Модель конструкции прибора

### 3. Препроцессинг модели

Препроцессинг модели для моделирования отклика на механические воздействия в зависимости от применяемой системы инженерного анализа (СИА) может включать следующие этапы:

- 1) импортирование созданной модели из сторонней CAD-системы;
- 2) реализация механических соединений;
- 3) создание файла материалов, из которых состоят компоненты исследуемой модели;
- 4) выбор конечно-разностных элементов для построения конечно-элементной сетки модели;
- 5) построение конечно-элементной сетки модели;
- 6) задание ограничений и нагрузок.

#### 3.1. Импортирование созданной модели

Если модель конструкции прибора создавалась в сторонней CAD-системе необходимо выполнить процесс ее импортирования в среду системы инженерного анализа. Некоторые СИА могут работать с файлами сторонних CAD-систем напрямую, а некоторые требуют преобразования в переходной формат: Parasolid (расширение \*.x\_t), ACIS (расширение \*.sat), IGES (расширение \*.igs) и т. д. В последнем случае в CAD-среде нужно сохранить созданную модель в требуемом переходном формате.

#### 3.2. Реализация механических соединений

В конструкциях электронных приборов используются паяные (ЭРИ), адгезионные (заливка) и резьбовые (корпусные детали) соединения. Реализация

соединений между компонентами в зависимости от используемой СИА производится либо автоматически на основе сопряжений, заданных в САД-системе, либо вручную операцией склеивания (булева операция). Система сама ищет сопряженные поверхности соединяемых компонентов и делает их общими, пользователю необходимо лишь указать соединяемые компоненты.

Если в СИА соединения компонентов осуществляется вручную, то соединение моделей ЭРИ, заливки и платы в единую модель электронного блока осуществлять склейкой данных моделей. Резьбовые соединения в данном случае реализуются склейкой всех компонентов, соединяемых соответствующей резьбовой деталью. В данном случае при создании модели в САД-системе винт и гайка создаются одним диаметром без резьбы. В результате склеивания у обоих компонентов соединения образуется общая поверхность, рис. 5.

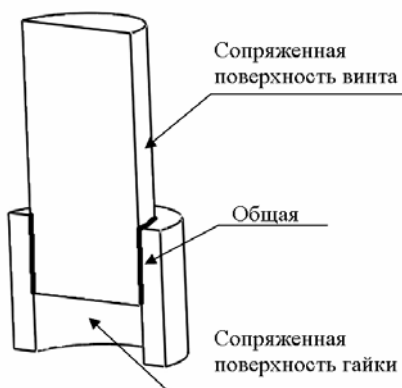


Рис. 5. Склейка крепежных элементов

### 3.3. Создание файла материалов

Для решения задач механических воздействий на исследуемую модель необходимо определить механические свойства материалов компонентов, входящих в эту модель. В различных СИА можно задавать свойства как линейно-деформируемых (упругих), так и нелинейно-деформируемых (пластичных) материалов. Обычно для решения конструкторских задач используется модель линейно деформируемого материала. Объясняется это тем, что после снятия нагрузки любая деталь должна принять свою первоначальную форму, что является залогом ее работоспособности. Характеристиками таких материалов являются модуль упругости и коэффициент Пуассона. Значения модуля упругости для компонентов модели, выполняемых из одного материала (основание, крышка, кожух, печатная плата, винт, гайка, втулка и др.) берутся из справочников для материалов. Для моделей ЭРИ, разъемов и созданных из нескольких ЭРИ компонентов модуль упругости нужно задавать равным модулю упругости материала печатной платы. Также необходимо задать плотность

материала для определения инерционных характеристик модели.

### 3.4. Выбор конечно-разностных элементов для разбиения модели

Выбор можно вести по следующим критериям:

- важность результатов расчетов для данного компонента модели;
- простота геометрической формы компонента модели.

Варианты могут быть следующими:

1) если компонент модели важен для расчетов и имеет форму объемного шестигранника, нужно выбрать конечно-разностный элемент для упорядоченного разбиения с большим количеством узлов;

2) если компонент не важен для расчетов (например, выполняет функцию концентрированной массы) и имеет простую форму (объемный шестигранник), нужно выбрать конечно-разностный для упорядоченного разбиения с малым количеством узлов;

3) если компонент имеет сложную форму (например, элемент заливки), нужно выбрать конечно-разностный для свободного разбиения, что даст и достаточно детальные результаты, и экономию машинных ресурсов.

### 3.5. Построение конечно-элементной сетки модели

Упорядоченное разбиение предназначено для построения конечно-элементной сетки на компонентах с простой геометрией, как правило, близких к четырехугольнику в двумерном случае и шестиграннику в трехмерном. Сетка получается регулярной с четко прослеживающимися рядами элементов.

Свободное разбиение предназначено для построения конечно-элементной сетки на компонентах со сложной геометрией. Сетка в результате получается неупорядоченной и может содержать элементы различной формы.

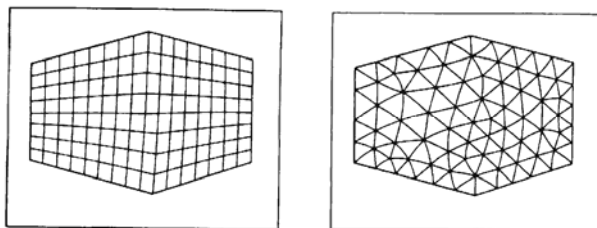


Рис. 6. Пример упорядоченного (слева) и свободного (справа) разбиений

Таким образом, для экономии трудозатрат необходимо определить компоненты с формой параллелепипеда и указать их для создания упорядоченной сетки, а для всех остальных компонентов выполнить свободное разбиение. Однако, если есть возможность, желательно использовать упорядоченное разбиение, так как оно, как правило, увеличивает точность решения.



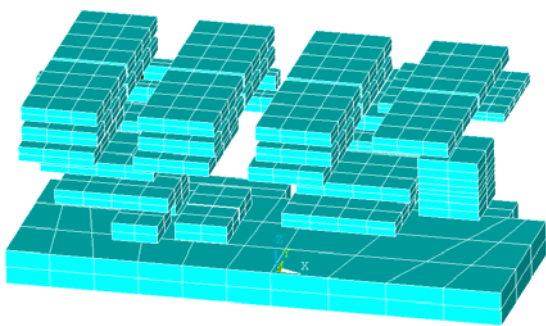


Рис. 7. Упорядоченная конечно-элементная сетка компонентов модели

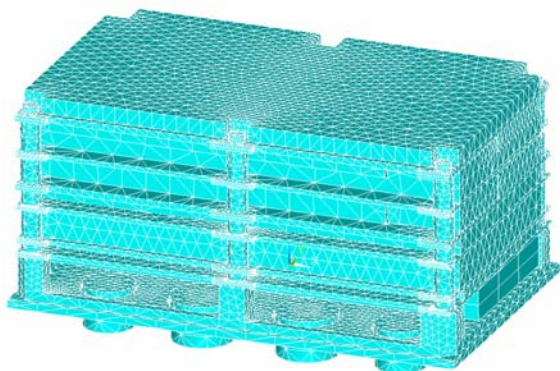


Рис. 8. Свободная конечно-элементная сетка компонентов модели

### 3.6. Задание нагрузок и ограничений

Для расчета модели на механические воздействия необходимо произвести ее закрепление, которое должно соответствовать реальному закреплению прибора в изделии. Закрепление модели в СИА реализуется заданием нулевых перемещений точек или поверхностей компонентов. Также задается направление закрепления.

В конструкциях электронных приборов используются три способа закрепления прибора:

- 1) через резьбовые отверстия в основании;
- 2) через сквозные отверстия через весь прибор;
- 3) через отверстия в приливах основания.

Таким образом, для закрепления моделей конструкций электронных приборов нужно задавать нулевые перемещения внутренних поверхностей крепежных отверстий во всех направлениях.

В качестве механической нагрузки можно задавать:

- 1) гармоническую вибрацию;
- 2) широкополосную случайную вибрацию;
- 3) ударный импульс.

Для задания параметров каждого вида нагрузки в СИА имеются специальные инструменты препроцессора. Кроме диапазона частот внешнего воздействия, формы импульса необходимо указать число шагов нагружения. Например, для диапазона от 0 до 1000 Гц с числом шагов нагружения 10 отклик конструкции будет найден для частот 100, 200,

300...1000 Гц. Первоначально рекомендуется задавать не менее 10 шагов нагружения. В дальнейшем можно провести более детальный расчет в окорезонансной области частот.

Для задания амплитуды ускорения вибрации необходимо использовать инструмент «гравитация». Направление ускорения – по продольной оси прибора (обычно ось Z).

## 4. Постпроцессинг

Для просмотра результатов моделирования в любом СИА имеется общий постпроцессор, в некоторых также есть постпроцессор процесса нагружения.

Общий постпроцессор позволяет исследовать перемещения, напряжения и другие результаты анализа модели. Постпроцессор процесса нагружения позволяет получить временную зависимость результатов расчета.

Основной целью расчета модели исследуемого объекта на воздействие механических факторов является получение амплитудно-частотных характеристик определенных точек модели. Данные точки, как правило, выбираются в местах установки компонентов модели, критических к данному виду нагружения. Чтобы визуализировать АЧХ выбранной точки (узла) модели, необходимо:

- войти в постпроцессор;
- выбрать узел модели, для которого необходимо получить АЧХ. Это можно сделать либо указанием на модели, либо ввести номер узла;
- задать направление, по которому осуществлялось приложение внешнего воздействия.

После выполнения вышеуказанных действий выводится АЧХ заданного узла модели, по которой можно определить критическую частоту и соответствующую ей максимальную амплитуду колебаний (перемещения или ускорения).

С помощью общего постпроцессора можно визуализировать форму колебания модели, определить напряжения, возникающие в выбранной точке, на критической частоте. По полученным результатам анализа можно сделать вывод либо о правильности принятых технических решений в отношении исследуемой конструкции, либо об ее дальнейшей оптимизации в случае возникновения недопустимых нагрузок на критические компоненты.

## Литература

1. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
2. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. М.: Советское радио, 1971.
3. Конструирование ячеек радиоэлектронной аппаратуры: Метод. указания к лаб. работам / Сост.: Л. Н. Панков, Т. Н. Фролова. Владимир, Владим. политехн. ин-т; 1993.



# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ СИСТЕМЫ Ti-Ni-Nb С ШИРОКИМ МАРТЕНСИТНЫМ ГИСТЕРЕЗИСОМ В ЛИТОМ И ПРЕССОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Д. В. Пресняков, Е. В. Щедрина, Н. Н. Попов, В. Ф. Ларькин, А. А. Аушев,  
Т. И. Сысоева, В. Н. Веселов, Е. Б. Суворова, А. А. Костылева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Перспективность материалов с памятью формы (МПФ) при использовании их в качестве новых конструкционных и функциональных материалов для разработки устройств и изделий из них в различных отраслях техники и медицины является общепризнанной.

Сплавы на основе никелида титана имеют высокие прочностные и пластические свойства, уникальные по величине и воспроизводимости эффекты термомеханической памяти (однократного эффекта памяти формы (ЭПФ) и эффекта обратимой памяти формы (ЭОПФ), псевдоупругости, демпфирования и др.), высокую надежность, механо- и термоциклическую долговечность, коррозионную стойкость, сравнительную простоту химического состава, технологического металлургического процесса и последующих производственных переделов [1].

С целью повышения надежности разрабатываемых изделий в РФЯЦ-ВНИИЭФ создана экспериментально-методическая база [2, 3] для исследования термомеханических характеристик (ТМХ) МПФ в широком диапазоне температур и скоростей деформаций, в том числе и после ударно-волнового нагружения. При этом определение термомеханических характеристик МПФ проводится различными взаимно дополняющими методами (рентгенофазовым, деформационным, ультразвуковым).

В данной работе приведены результаты исследований структурного, фазового состава, механических и термомеханических свойств перспективного сплава с памятью формы системы Ti-Ni-Nb с широким мартенситным гистерезисом в литом и прессованном состоянии.

## 1. Объекты исследований

В качестве объекта исследования был выбран сплав системы Ti-Ni-Nb (никелид титана, легированный ниобием), партия № 72 (поставщик ФГУП «ВИАМ», г. Москва) в литом и прессованном состоянии.

Для исследования элементного состава и проведения микроструктурных исследований сплава от каждого из прутков отрезали заготовки в виде цилиндров, из которых затем изготавливали шлифы. Рентгенофазовые исследования проводили на образцах, эскиз и размеры которых приведен на рис. 1.

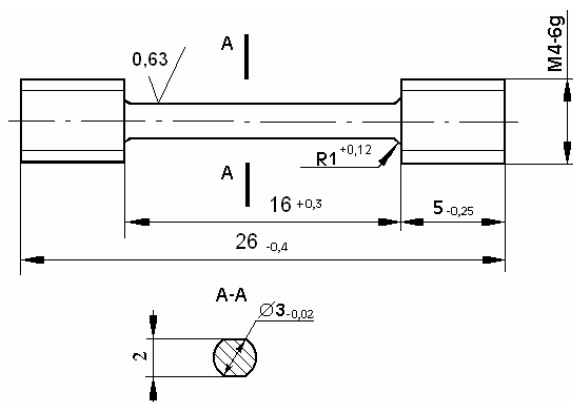


Рис. 1. Эскиз микрообразца для рентгенофазовых исследований

Исследования основных механических и термомеханических свойств сплава Ti-Ni-Nb проводили на цилиндрических образцах. Эскиз и размеры образца приведены на рис. 2.

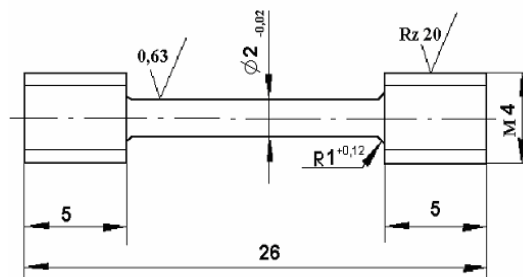


Рис. 2. Эскиз микрообразца для исследования механических и термомеханических свойств

В табл. 1 представлены виды и режимы термической обработки (ТО) для проведения исследований различных свойств сплава Ti-Ni-Nb, которые были выбраны с учетом результатов предыдущих экспериментов.

Таблица 1

Виды и режимы термообработки сплавов системы Ti-Ni-Nb

№ режима ТО	Вид ТО	Режим ТО
1	без ТО	Состояние поставки
2	закалка	-196 °С → 800 °С выдержка 15 минут → охлаждение в воду
25	вакуумный отжиг	+20 °С → 850 °С выдержка 4 часа → охлаждение с печью

## 2. Описание экспериментов и обсуждение результатов

### 2.1. Определение элементного состава, микроструктуры сплава системы Ti-Ni-Nb

Химический состав (масс. %) сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии (ТО № 1) по результатам проведения элементного анализа на рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе представлен в табл. 2.

Таблица 2

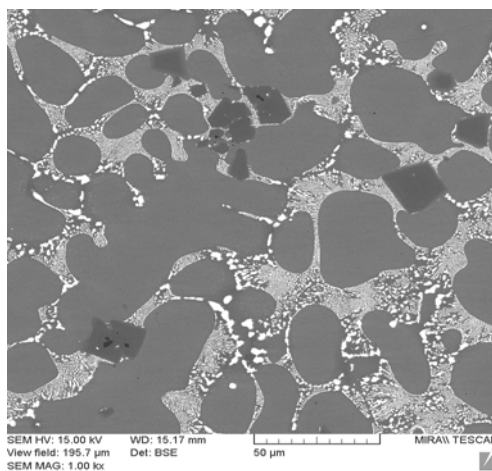
Средние значения концентраций элементов в образцах сплава системы Ti-Ni-Nb в состоянии поставки (ТО № 1), определенных микроструктурным методом

Состояние прутка	Элементный состав		
	Ti	Ni	Nb
Массовое содержание, %			
Литой	36,7 ± 0,9	45,9 ± 2,7	17,4 ± 3,2
Прессованный	38,1 ± 0,6	45,7 ± 0,9	16,2 ± 1,3

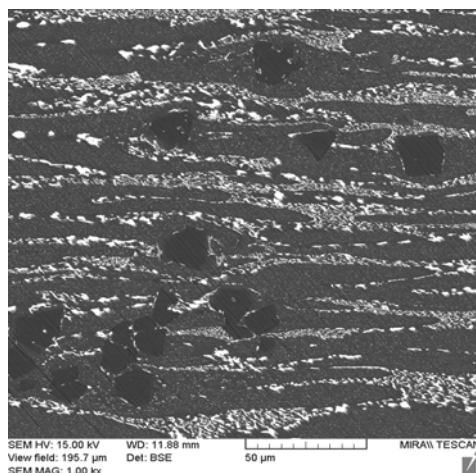
При статистической обработке результатов измерения элементного состава сплава Ti-Ni-Nb по критериям Фишера, Стьюдента и приближенному *t*-критерию [4] для элементов Ni и Nb не выявлено статистически значимого различия значений массового содержания элемента в прессованном и литом состоянии, но выявлено статистически значимое различие значений массового содержания элемента Ti, которое может повлиять на механические и термомеханические свойства данного сплава.

На рис. 3 в режиме атомного контраста представлено изображение структуры сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии, полученное в результате микроструктурного анализа. Установлено, что основной фазой структуры сплава Ti-Ni-Nb являются зерна интерметаллида TiNi с примесью нио-

бия округлой или дендритной формы серого цвета; по границам располагаются включения чистого ниобия белого цвета округлой формы размером до 6 мкм. В эвтектике присутствуют отдельные включения Ti<sub>2</sub>Ni темно-серого цвета размером до 20 мкм. В прессованном состоянии фиксируется мелкодисперсная структура TiNi, также хорошо видна сильная вытянутость структуры вдоль проката.



а)



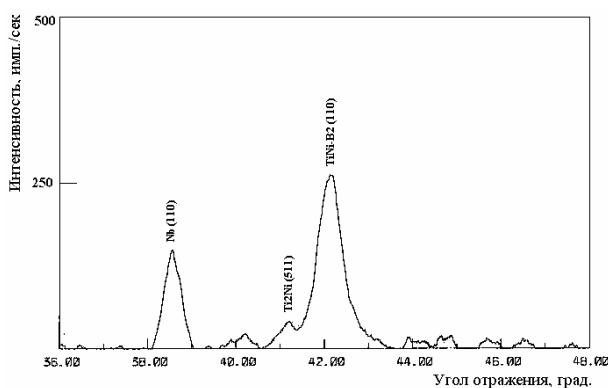
б)

Рис. 3. Микроструктура сплава Ti-Ni-Nb (ТО № 1) в литом (а) и прессованном (б) состояниях (в режиме атомного контраста)

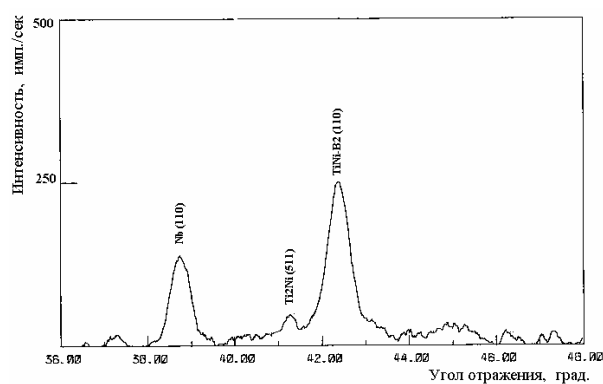
Анализ изображений участков поверхности шлифов образцов сплава Ti-Ni-Nb в исходном состоянии позволил выделить несколько фазовых структур, в которых находятся элементы исследуемого сплава, а также включения, образовавшиеся в процессе плавки. Результаты измерения элементного состава с указанием фазовых структур в областях различного атомного контраста представлены в табл. 3.

Результаты измерения элементного состава сплавов системы Ti-Ni-Nb в литом и прессованном исходном состояниях в областях различного атомного контраста

Наименование областей равного атомного контраста (по уровню серого цвета)	Элементный состав, масс. %				Атомная концен- трация	Фазы
	Ti	Ni	Nb	C		
Литой						
Серого цвета	40,1	52,6	7,2	–	$Ti_{46,2}Ni_{49,5}Nb_{4,3}$	никелид титана (TiNi) легированный ниобием (атомное соотношение Ti/Ni $\approx$ 0,93)
Темно-серого цвета	48,3	35,1	14,1	–	$Ti_{57,4}Ni_{34}Nb_{8,6}$	Ti <sub>2</sub> Ni легированный ниобием (атомное соотношение Ti/Ni $\approx$ 1,69)
Белого цвета	13,4	3,7	82,9	–	$Ti_{22,7}Ni_{5,1}Nb_{72,2}$	ниобий (Nb) легированный Ti и Ni
Черного цвета	74	1,3	6,4	16	$Ti_{52,1}Ni_{0,8}Nb_{2,3}C_{44,8}$	карбид (Ti,Nb)C
Прессованный						
Серого цвета	42	50	7,2	–	$Ti_{48,6}Ni_{47,2}Nb_{4,3}$	никелид титана (TiNi) легированный ниобием (атомное соотношение Ti/Ni $\approx$ 1,03...1,0)
Темно-серого цвета	47	32	16	–	$Ti_{57,8}Ni_{32,1}Nb_{10,1}$	Ti <sub>2</sub> Ni легированный ниобием (атомное соотношение Ti/Ni $\approx$ 1.85...1.64)
Белого цвета	10,5	6,6	82,6	–	$Ti_{18}Ni_{9,2}Nb_{72,8}$	ниобий (Nb) легированный Ti и Ni

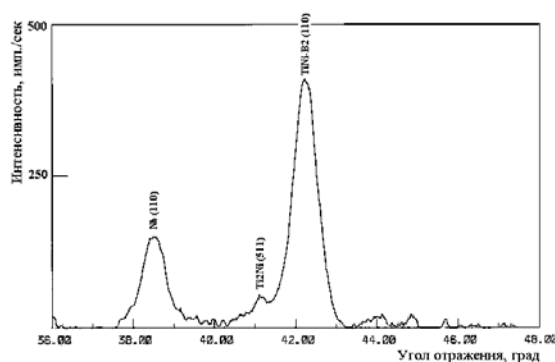


а)

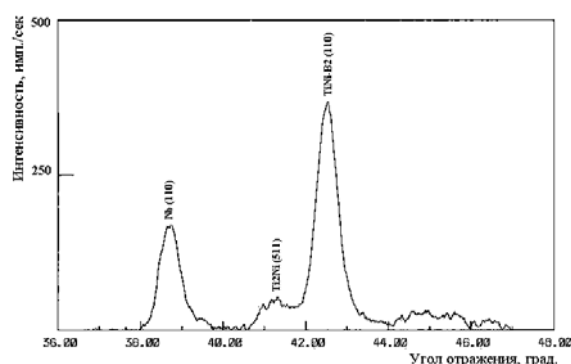


б)

Рис. 4. Дифрактограммы образца № 1 сплава Ti-Ni-Nb в литом состоянии (ТО № 1), снятые при температуре: а) 20 °С; б) минус 180 °С



а)



б)

Рис. 5. Дифрактограммы образца № 3 сплава Ti-Ni-Nb в прессованном состоянии (ТО № 1), снятые при температуре:

## 2.2. Исследования фазового состава и температур фазовых превращений сплава системы Ti-Ni-Nb рентгеноструктурным методом

На рентгеновском дифрактометре проведены рентгеноструктурные исследования сплава Ti-Ni-Nb после различных видов и режимов ТО (см. табл. 1): образцов № 1 (ТО № 1), № 2 (ТО № 25), находящихся

в литом состоянии, и образцов № 3 (ТО № 1), № 4 (ТО № 2), находящихся в прессованном состоянии.

На дифрактограммах образцов исследуемого сплава (рис. 4а, 5а, 6а, 7а), снятых в интервале брэгговских углов  $2\theta = 36 \div 48^\circ$ , регистрируются три фазы. Основной фазой является никелид титана TiNi (B2-аустенит), имеющей ОЦК решетку. Другая фаза, присутствующая в значительном количестве, – нио-

бий (Nb) с ОЦК решеткой. Кроме линий основных фаз на рентгенограммах присутствует слабая линия «паразитной» фазы  $Ti_2Ni$  с ГЦК решеткой. Эта фаза образуется в условиях неравновесной плавки и мало изменяется при дальнейшей обработке.

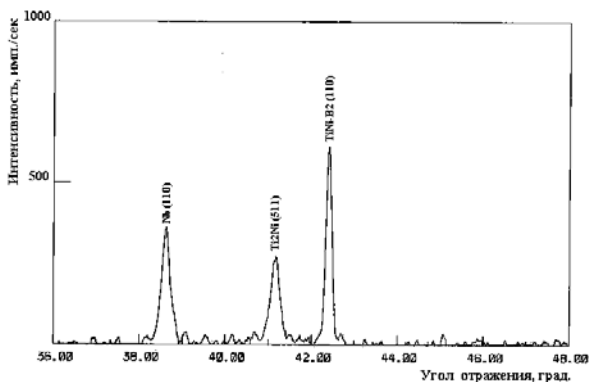
Для реализации в сплаве мартенситного превращения образцы сначала охлаждали до температуры минус 180 °С, а затем нагревали до температуры 25 °С. В процессе охлаждения образцов при температуре начала прямого мартенситного превращения  $M_s$  интенсивность пика фазы TiNi (B2) с упорядоченной кристаллической ОЦК-решеткой уменьшается до температуры окончания прямого мартенситного превращения  $M_f$ , при этом появляются и увеличиваются пики низкотемпературной моноклинно-искаженной орторомбической мартенситной фазы TiNi (B19'). В результате фаза TiNi (B2) претерпевает прямое мартенситное превращение. При последующем нагреве образцов сплава развивается обратное мартенситное превращение, при этом регистрируются температуры  $A_s$  и  $A_f$  начала и окончания обратного мартенситного превращения, соответственно.

Исследование кинетики мартенситного превращения в образцах № 1 (литой) и № 3 (прессованный), находящегося в исходном состоянии (ТО № 1), показало, что интенсивность отражения фазы TiNi (B2) незначительно уменьшается, при этом в интервале брегговских углов  $2\theta = 44 \div 46^\circ$ , в которых должны

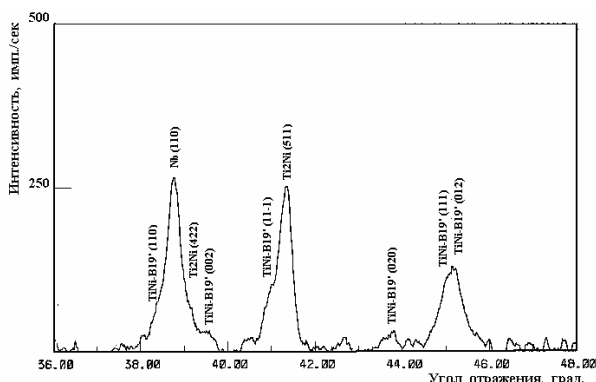
располагаться основные отражения фазы TiNi (B19'), наблюдается небольшое колебание фона (рис. 4, 5). Исходя из этого, можно предположить, что в этих образцах произошло частичное мартенситное превращение, однако методом рентгенофазового анализа зарегистрировать его не удалось.

Исследование кинетики мартенситного превращения в образцах № 2 (литой, ТО № 25) и № 4 (прессованный, ТО № 2) показало, что прямое мартенситное превращение развивается по одностадийной схеме  $B2 \rightarrow B19'$ . При этом в образце № 2 фаза TiNi (B2-аустенит) полностью переходит в TiNi (B19'-мартенсит) (рис. 6), а в образце № 4 мартенситное превращение не полное, в сплаве присутствует значительное количество остаточного B2-аустенита вплоть до минимальной температуры охлаждения (-180) °С (рис. 7). При нагреве от минус 180 °С в указанных образцах сплава развивается обратное мартенситное превращение, при этом B19'-мартенсит полностью переходит в B2-аустенит.

В результате исследования кинетики мартенситного превращения в образцах сплава Ti-Ni-Nb были зарегистрированы температуры фазовых превращений, которые приведены в табл. 4. Погрешность измерения температур фазовых переходов, полученных методом рентгенофазового анализа, составляет ( $\pm 5$ ) °С.

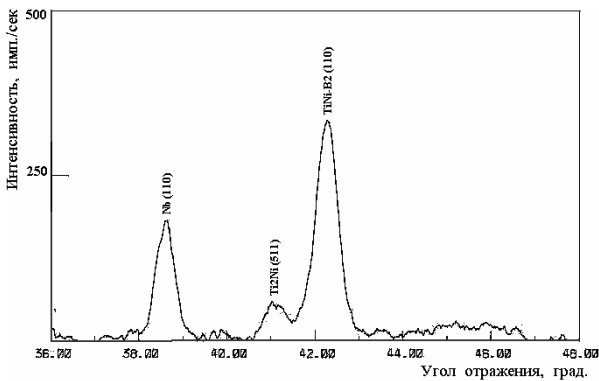


а)

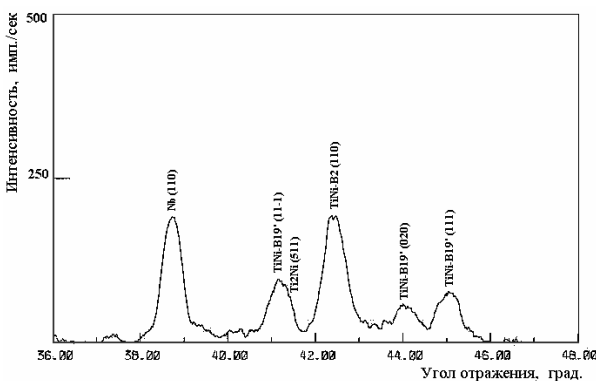


б)

Рис. 6. Дифрактограммы образца № 2 сплава Ti-Ni-Nb в литом состоянии (ТО № 25), снятые при температуре: а) 20 °С; б) минус 180 °С



а)



б)

Рис. 7. Дифрактограммы образца № 4 сплава Ti-Ni-Nb в прессованном состоянии (ТО № 2), снятые при температуре: а) 20 °С; б) минус 180 °С

Температуры фазовых превращений образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии

№ образца	Состояние сплава	№ ТО	Температуры фазовых переходов, °С			
			$M_s$	$M_f$	$A_s$	$A_f$
образец № 1	Литой	1	*	*	*	*
образец №2		25	-50	-105	-50	0
образец № 3	Прессованный	1	*	*	*	*
образец № 4		2	-30	-80	-20	20

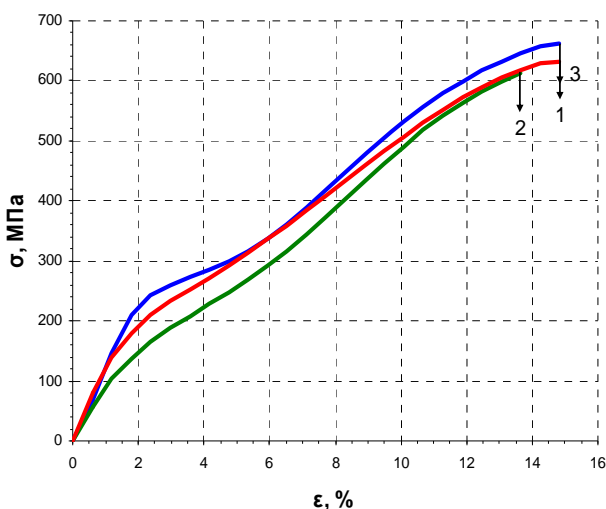
\* – в данных образцах указанные температуры фазовых переходов методом рентгенофазового анализа зарегистрировать не удалось

Таблица 5

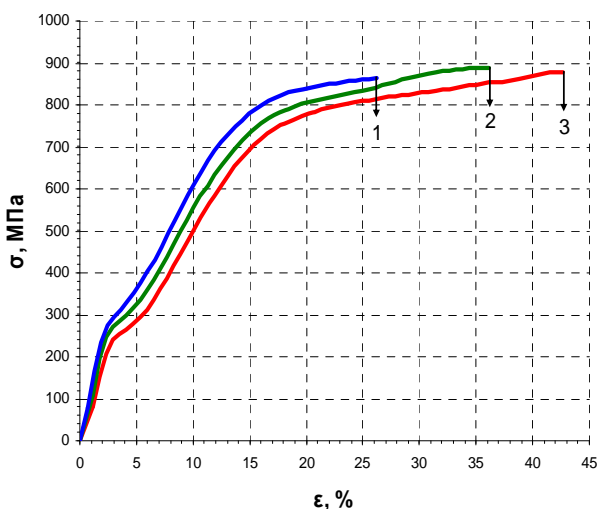
Средние значения основных механических характеристик, полученных при растяжении образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии

Состояние сплава	Количество образцов	№ ТО	$\sigma_{\phi}$ , МПа	$\sigma_{\tau}^{\text{МПФ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\varepsilon_0^{\text{max}}$ , МПа	$\delta$ , %
Литой	3	1	210	603	635	14,84	7,42
	3	2	153	560	613	14,05	9,57
	3	25	223	630	652	15,23	10,20
Прессованный	3	1	262	832	864	26,68	17,96
	3	2	255	838	868	33,99	25,85
	3	25	255	810	880	43,00	31,02

№ ТО – номер режима термообработки;  $\sigma_{\phi}$  – фазовый предел текучести;  $\sigma_{\tau}^{\text{МПФ}}$  – предел текучести материала с памятью формы;  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности;  $\varepsilon_0^{\text{max}}$  – максимальная деформация образца перед разрывом (под нагрузкой), соответствующая напряжению предела прочности;  $\delta$  – относительное удлинение образца после разрыва



а) в литом состоянии



б) в прессованном состоянии

1 – ТО № 1; 2 – ТО №2; 3 – ТО № 25

Рис. 8. Типичные диаграммы растяжения в координатах ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) образцов сплава Ti-Ni-Nb, полученные по результатам ис-

### 2.3. Определение механических свойств сплава системы Ti-Ni-Nb

Проведены механические испытания на растяжение образцов (рис. 2) сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии после ТО по режимам №№ 1, 2, 25 (табл. 1). Растяжение образцов проводили на испытательной машине UTS-100K в диапазоне температур  $T = (-55 \div -65)^\circ\text{C}$ , со скоростью деформации  $\dot{\varepsilon} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (скорость передвижения traversы 1 мм/мин).

Типичные диаграммы растяжения образцов сплава Ti-Ni-Nb в различных состояниях и средние значения основных механических характеристик представлены на рис. 8 и в табл. 5, соответственно.

При статистической обработке результатов механических испытаний образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии по критериям Фишера, Стьюдента и приближенному  $t$ -критерию [4] выявлено статистически значимое влияние состояния сплава на механические характеристики  $\sigma_{\phi}$ ,  $\sigma_{\tau}^{\text{МПФ}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\varepsilon_0^{\text{max}}$ ,  $\delta$  для каждого из режимов ТО, кроме параметра  $\sigma_{\phi}$  после режима ТО № 25. Причем сред-

ние значения механических характеристик, полученных при испытании образцов сплава Ti-Ni-Nb в прессованном состоянии, в 1,2÷3 раза больше средних значений, полученных при испытании образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом состоянии.

#### 2.4. Определение термомеханических характеристик сплава системы Ti-Ni-Nb

Проведены эксперименты по определению термомеханических характеристик сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии после ТО по режимам №№ 1, 2, 25 (табл. 1). Характеристические температуры формовосстановления  $A_s^{\text{ЭПФ}}$ ,  $A_f^{\text{ЭПФ}}$  и формоизменения  $M_s^{\text{ЭОПФ}}$ ,  $M_f^{\text{ЭОПФ}}$  в свободном состоянии, обусловленные фазовыми превращениями, – это рабочие температуры, при которых происходит изменение линейных размеров образца (срабатывание).

Сначала на испытательной машине UTS-100K при температурах  $T = (-55 \div -65)^\circ\text{C}$  образцам навели деформацию растяжением со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (скорость передвижения траверсы 1 мм/мин), при заданной одинаковой общей деформации  $\epsilon_0 = 11\%$ .

Сразу же после наведения деформации в диапазоне температур  $T = (-55 \div -65)^\circ\text{C}$  исследуемые образцы при отрицательных температурах поочередно устанавливали в предварительно охлажденную до приблизительно такой же температуры термокамеру устройства P1084 для исследования ТМХ материалов с памятью формы. Затем производили нагрев образцов до температуры  $T = (100 \div 110)^\circ\text{C}$  с темпом нагрева  $4^\circ\text{C}/\text{мин}$  и их охлаждение до температуры  $T = (-120 \div -140)^\circ\text{C}$ . При нагреве образцы укорачивались – наблюдалось проявление ЭПФ. При охлаждении образцы незначительно удлинялись – наблюдалось проявление ЭОПФ.

В ходе проведения экспериментов с помощью цифровой растровой системы линейных измерений устройства P1084 происходила регистрация изменения длины образцов при их нагреве и охлаждении. Регистрацию температуры осуществляли при помощи термопары хромель-копель.

По результатам исследований были построены диаграммы формовосстановления при нагреве (проявлении ЭПФ) и формоизменения при охлаждении (проявлении ЭОПФ) образцов сплава Ti-Ni-Nb, которые представлены на рис. 9 и 10, соответственно. По этим диаграммам методом касательных определяли температуры начала  $A_s^{\text{ЭПФ}}$  и окончания  $A_f^{\text{ЭПФ}}$  формовосстановления в свободном состоянии при проявлении ЭПФ (рис. 9) и температуры начала  $M_s^{\text{ЭОПФ}}$  и окончания  $M_f^{\text{ЭОПФ}}$  формоизменения при проявлении ЭОПФ в свободном состоянии во время охлаждения после проявления ЭПФ (рис. 10). Значения полученных результатов приведены в табл. 6.

При статистической обработке результатов исследования термомеханических характеристик образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии по критериям Фишера, Стьюдента и приближенному  $t$ -критерию [4] выявлено статистически значимое влияние состояния сплава на термомеханические характеристики:  $A_s^{\text{ЭПФ}}$  после режимов ТО №№ 1, 2, 25;  $A_f^{\text{ЭПФ}}$  после режимов ТО №№ 1, 2;  $M_f^{\text{ЭОПФ}}$  после режима ТО № 25; интервал температур ( $A_s^{\text{ЭПФ}} - A_f^{\text{ЭПФ}}$ ) после режима ТО № 1; интервал температур ( $M_s^{\text{ЭОПФ}} - M_f^{\text{ЭОПФ}}$ ) после режима ТО № 25. Причем средние значения ТМХ, полученных при испытании образцов сплава Ti-Ni-Nb в прессованном состоянии, в 1,2÷3,4 раза больше средних значений, полученных при испытании образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом состоянии. Средние значения интервала температур ( $A_s^{\text{ЭПФ}} - A_f^{\text{ЭПФ}}$ ) после режимов ТО № 1 и интервала температур ( $M_s^{\text{ЭОПФ}} - M_f^{\text{ЭОПФ}}$ ) после режима ТО № 25, полученных при испытаниях образ-

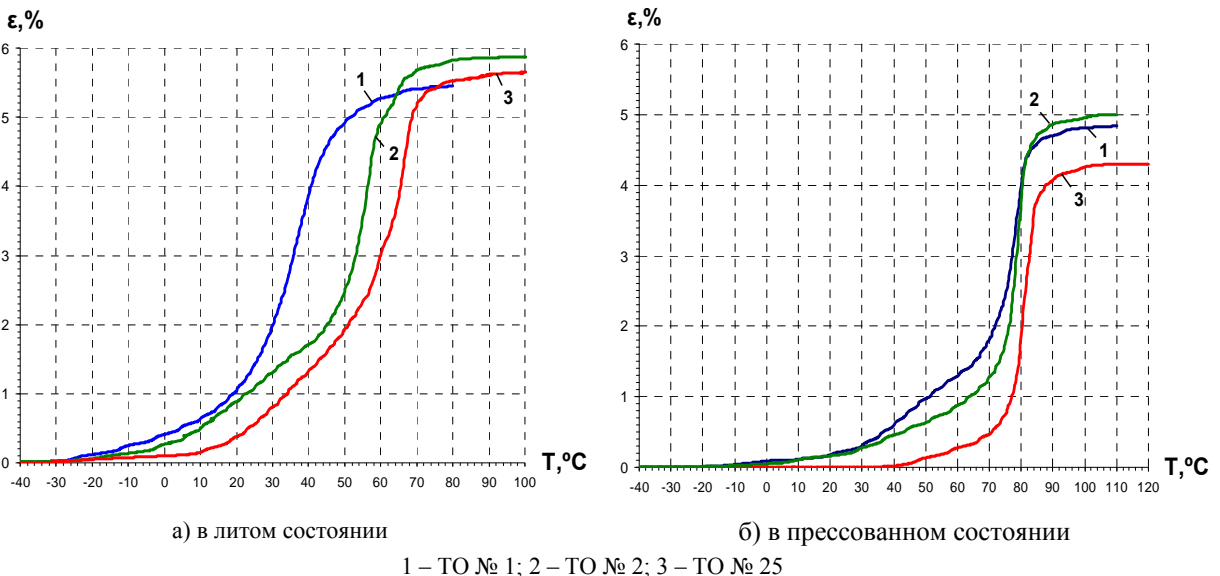


Рис. 9. Типичные диаграммы формовосстановления образцов сплава Ti-Ni-Nb при проявлении ЭПФ после предварительной деформации растяжением при температурах  $(-55 \div -65)^\circ\text{C}$  со скоростью  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

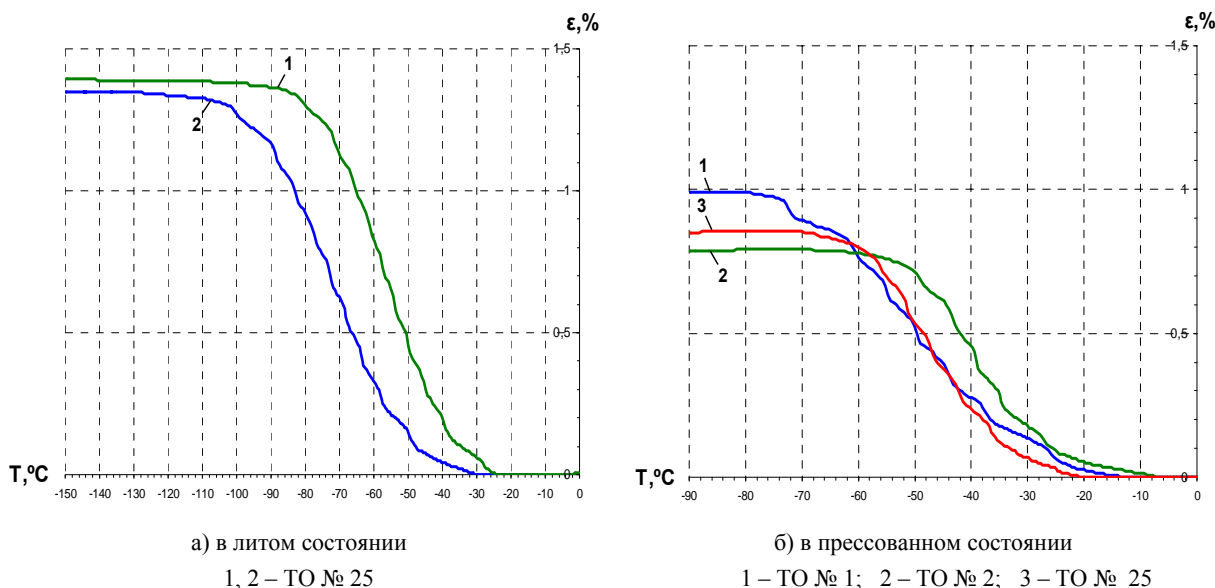


Рис. 10. Типичные диаграммы формоизменения образцов сплава Ti-Ni-Nb при проявлении ЭОПФ после предварительной деформации растяжением при температурах  $(-55 \div -65)^\circ\text{C}$  со скоростью  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

Таблица 6

Средние значения характеристических температур формовосстановления и формоизменения образцов сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии при проявлении ЭПФ и ЭОПФ, соответственно

Состояние сплава	Количество образцов	№ ТО	$A_s^{\text{ЭПФ}}, ^\circ\text{C}$	$A_f^{\text{ЭПФ}}, ^\circ\text{C}$	Интервал $(A_s^{\text{ЭПФ}} - A_f^{\text{ЭПФ}}), ^\circ\text{C}$	$M_s^{\text{ЭОПФ}}, ^\circ\text{C}$	$M_f^{\text{ЭОПФ}}, ^\circ\text{C}$	Интервал $(M_s^{\text{ЭОПФ}} - M_f^{\text{ЭОПФ}}), ^\circ\text{C}$
Литой	2	1	20	47	28	—	—	—
	2	2	42	64	22	—	—	—
	2	25	43	74	31	-43	-86	43
Прессованный	3	1	67	81	14	-25	-63	38
	3	2	70	84	14	-24	-47	22
	3	25	76	86	11	-33	-51	21

№ ТО – номер режима термообработки;  $A_s^{\text{ЭПФ}}$  – температура начала формовосстановления образца при проявлении ЭПФ;  $A_f^{\text{ЭПФ}}$  – температура окончания формовосстановления образца при проявлении ЭПФ;  $M_s^{\text{ЭОПФ}}$  – температура начала формоизменения образца при проявлении ЭОПФ;  $M_f^{\text{ЭОПФ}}$  – температура окончания формоизменения образца при проявлении ЭОПФ

цов сплава Ti-Ni-Nb в прессованном состоянии, в 2 раза меньше средних значений данных интервалов в литом состоянии. Статистически значимого влияния состояния сплава на термомеханические характеристики  $A_f^{\text{ЭПФ}}$  и  $M_s^{\text{ЭОПФ}}$  после режимов ТО №25, а также на интервал температур  $(A_s^{\text{ЭПФ}} - A_f^{\text{ЭПФ}})$  после режимов ТО №2, 25 не выявлено.

### Выводы

1. В работе проведены исследования различных свойств перспективного сплава с памятью формы системы Ti-Ni-Nb с широким мартенситным гистерезисом в литом и прессованном состоянии.

2. В результате электронно-зондового анализа определен элементный качественный и количественный состав сплава Ti-Ni-Nb в состоянии поставки; выделено несколько фазовых структур, в которых находятся элементы сплава. Выявлены сходство и

различия в микроструктуре сплава в литом и прессованном состоянии.

3. В результате рентгеноструктурного анализа определены основные фазы и исследована кинетика мартенситного превращения в сплаве Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии после различных видов и режимов термообработки, а также зарегистрированы температуры фазовых превращений.

4. На испытательной машине UTS-100K со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  проведены механические испытания на растяжение образцов сплава Ti-Ni-Nb после различных видов и режимов термообработки и определены средние значения основных механических характеристик, которые в прессованном состоянии в 1,2÷3 раза больше, чем в литом. В основном выявлено статистически значимое влияние состояния сплава на механические характеристики  $\sigma_\phi$ ,  $\sigma_T^{\text{МПФ}}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\epsilon_0^{\text{max}}$ ,  $\delta$  для различной термообработки.



5. Определены термомеханические характеристики сплава Ti-Ni-Nb в литом и прессованном состоянии после различных видов и режимов термообработки. В ряде случаев выявлено статистически значимое влияние состояния сплава на ТМХ для различной термообработки.

6. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения сплава Ti-Ni-Nb с эффектом памяти формы в разработках института, а именно: термомеханическом соединении трубопроводов и обратном клапане в системе газового наполнения, размыкателе электрических цепей в системах автоматики, устройстве безопасности для перерезания при возникновении пожара жгутов системы кольцевой разводки и др.

### Литература

1. Пушин В. Г. Особенности структурных и фазовых превращений и физико-механические свойства

сплавов с термомеханической памятью. Новые технологии. Применение // Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы: Труды XXXVIII семинара «Актуальные проблемы прочности», посвященного памяти В. А. Лихачева. Санкт-Петербург, Россия, 2001. Ч. 1. С. 289–292.

2. Попов Н. Н. Новые технологии с использованием материалов, обладающих эффектом памяти формы // Конверсия в машиностроении. 2005. № 3. С. 27–40.

3. Попов Н. Н. Экспериментально-методическая база для исследования термомеханических свойств материалов с эффектом памяти формы // Заводская лаборатория: Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 12. С. 34–39.

4. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М: Машиностроение, 1985.

# МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РЕЗЦОВ

Е. А. Рыбкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При обработке металлов резанием существует необходимость увеличения стойкости резцов с твердосплавными напайными пластинами. Увеличение стойкости возможно двумя методами: нанесение покрытий и магнитно-импульсное упрочнение. Недостаток нанесения покрытий – снижение стойкости инструмента после переточки, для восстановления стойкости необходимо вновь наносить покрытие. Для нанесения покрытия инструмент необходимо снова отправлять в инструментальный цех, что снижает оперативность работы, и в конечном итоге увеличивает стоимость изготовления деталей. При магнитно-импульсном упрочнении, стойкость инструмента после переточки значительно не изменяется.

В настоящей работе рассмотрен метод магнитно-импульсного упрочнения инструмента.

Главной особенностью ферромагнитных сплавов является наличие доменной структуры. При намагничивании происходит смещение междоменных границ. Благодаря коэрцитивной силе после намагничивания доменная структура не возвращается в исходное состояние. Это обстоятельство и объясняет остаточное упрочнение.

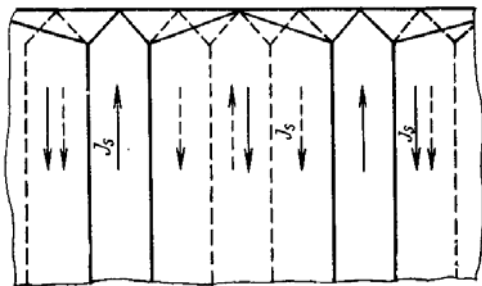


Рис. 1. Доменная структура до намагничивания (---) и после выключения магнитного поля (—)

С течением времени доменная структура (рис. 1) стремится к восстановлению исходных конфигураций по причине их энергетической стабильности, соответствующей минимуму магнитной энергии. Размеры доменов постепенно уменьшаются, а их число увеличивается. Можно ожидать, что сплавы с меньшей коэрцитивной силой будут иметь и меньший прирост упрочнения в результате намагничивания.

Так же нужно учитывать изменения на поверхности реального инструмента в результате финишных операций шлифования или заточки. В поверхно-

стных слоях инструмента при обработке абразивными кругами могут происходить сильные локальные разогревы, приводящие к появлению «прижогов» – участков с измененной структурой. Характер изменения структуры определяется сочетанием высоких скоростей нагрева и охлаждения с сильным наклепом приповерхностных слоев. Т. е. эффект намагничивания зависит как от химического состава твердосплавных материалов, так и от режима финишных операций, в результате которых создается определенное состояние поверхностного слоя.

При намагничивании в твердосплавных материалах снижается концентрация напряжений, вследствие чего улучшаются механические свойства, повышается микротвердость, увеличиваются напряжения, удерживающие смазочный материал, повышается закрепление в пограничном слое легирующих элементов, таких, например, как кобальт. При этом повышается теплопроводность материала, увеличивается временное сопротивление на изгиб на 15...20 %, что обуславливает снижение выкрашивания зерен из режущей кромки инструмента при резании металлов и сплавов.

Для эксперимента было взято 10 резцов, 8 из них подвергались намагничиванию. Предварительно все резцы были замаркированы с присвоением порядковых номеров от 1 до 10.

Намагничивание резцов производилось на установке «Бизон», на которой величина магнитного поля изменялась путем изменения заряда конденсаторов, подаваемого на магнитную катушку. За основные напряжения были взяты 3,5 кВ и 5 кВ. Для данной установки 5 кВ является оптимальным напряжением.

В связи с неоднородностью магнитного поля в полости соленоида применялась 4-е схемы намагничивания резцов. По каждой схеме выполнялось два цикла намагничивания, с перерывом между циклами 5 мин. Длительность импульса составляла 0,5 с.

## Схемы намагничивания

Схема № 1 (рис. 2) – без вибрации испытуемого образца (резец, твердосплавная пластина которого была сорентирована строго в центре, по оси соленоида магнитной катушки). Образец помещают в центр оправки. При намагничивании образец совершает вибрации, исключение которых производится при помощи втулок, размещаемых в оправке по обе

стороны от резца, так, что его твердосплавная пластина, оказывается, по центру соленоида. Для предотвращения образования микротрещин и сколов на твердосплавной пластине, втулки изготавливались из полистирольного пенопласта плотностью  $0,1 \text{ г/см}^3$ .

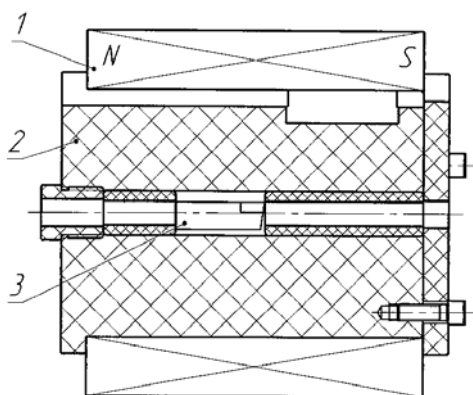


Рис. 2. Схема № 1: Намагничивание без вибрации испытуемого образца (резца) с ориентацией твердосплавной пластины в центре соленоида: 1 – магнитно-импульсная катушка; 2 – оправка с втулками; 3 – резец

Схема № 2 (рис. 3) – с вибрацией испытуемого образца (резец, был сориентирован в центре по оси соленоида магнитной катушки и мог совершать колебательные движения). Образец помещают в центр оправки. При намагничивании образец совершает вибрации. Для предотвращения образования микротрещин и сколов на твердосплавной пластине на концах отверстия, в котором находится образец, помещают небольшие втулки, выполненные из полистирольного пенопласта плотностью  $0,1 \text{ г/см}^3$ .

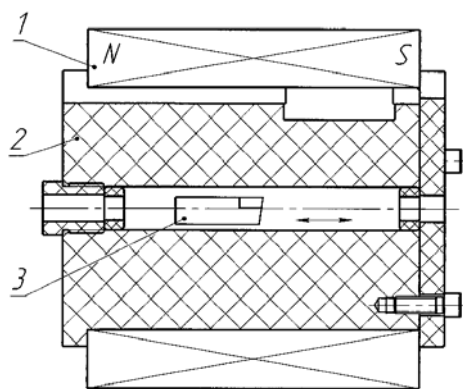


Рис. 3. Схема № 2: Намагничивание с вибрацией испытуемого образца (резца), выполняющего колебательные движения: 1 – магнитно-импульсная катушка; 2 – оправка с втулками; 3 – резец

Схема № 3 (рис. 4) – без вибрации испытуемого образца (резец, который был сориентирован в положении близком к внутреннему контуру магнитной катушки со стороны северной полярности соленоида). Образец помещают в специально выполненный

паз на оправке. Оправку устанавливают в соленоид так, чтобы образец находился со стороны его северной полярности.

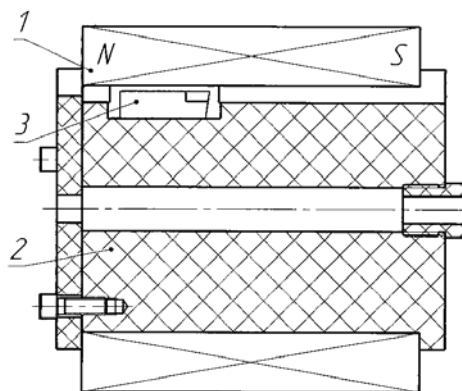


Рис. 4. Схема № 3: Намагничивание без вибрации испытуемого образца (резца) с ориентированием его со стороны северной полярности соленоида: 1 – магнитно-импульсная катушка; 2 – оправка; 3 – резец

Схема № 4 (рис. 5) – без вибрации испытуемого образца (резец, который был сориентирован в положении близком к внутреннему контуру магнитной катушки со стороны южной полярности соленоида). Образец помещают в специально выполненный паз на оправке. Оправку устанавливают в соленоид таким образом, чтобы образец находился со стороны его южной полярности.

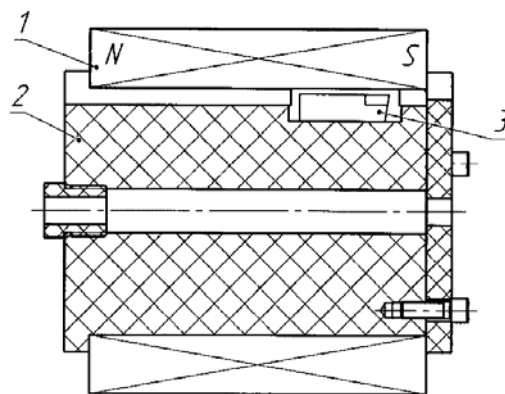


Рис. 5. Схема № 4: Намагничивание без вибрации испытуемого образца (резца) с ориентированием его со стороны южной полярности соленоида: 1 – магнитно-импульсная катушка; 2 – оправка; 3 – резец

После проведения намагничивания для уменьшения в намагниченных образцах свободной энергии, резцы устанавливаются на 24 ч в деревянные подставки.

Основными характеристиками намагниченных образцов являются остаточная индукция и коэрцитивная сила. После намагничивания была измерена величина остаточной индукции магнитного поля на твердосплавных пластинах всех резцов. Измерения

проводились тесламетром ТХ-4 по передней поверхности резцов. Намагниченность образцов наблюдалась весь период при проведении экспериментов и являлась неизменной даже после расточной обработки деталей. Намагниченность резцов изменилась только после их переточки, она уменьшилась в среднем на 6,56 %, что свидетельствует о глубине упрочненного слоя и объясняется образованием доменной структуры под действием магнитного поля. Наличие остаточной индукции 0,03 мТл у не намагниченных резцов является погрешностью измерения тесламетром.

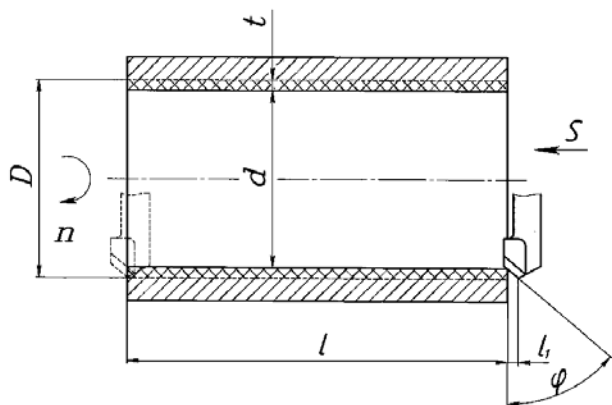


Рис. 6. Схема обработки детали типа стакан

Обработка деталей (рис. 6) производится на токарно-винторезном станке с ЧПУ модель 16М30Ф3. Детали поступающие на обработку имеют твер-

дость поверхности 36,5...41,5 HRC. Перед обработкой намагниченные (рис. 8) и не намагниченные (рис. 9) резцы устанавливаются в специальную расточную державку. Производится полустачное растачивание с  $\varnothing 62$  до  $\varnothing 64$  (без охлаждения). Обработка ведется намагниченными и не намагниченными резцами. Режимы резания:  $t = 1$  мм;  $S = 0,2$  мм/об;  $n = 260$  об/мин.

Износ резцов (рис. 7) измерялся по обработанной площадке износа на кромке со стороны главной задней поверхности. Измерения проходили на микроскопе УИМ-21 (5x увеличение; цена деления 0,001 мм). Максимально допустимый износ по главной задней поверхности для твердосплавных проходных резцов при полустачной обработке стали составляет 0,8–1 мм. Главная режущая кромка и главная задняя поверхность резцов были сфотографированы цифровым фотоаппаратом с использованием микроскопа МПБ-2 (24x увеличение, цена деления 0,05 мм).

У не намагниченных резцов (рис. 9) износ вершины, главной режущей кромки, а так же главной задней поверхности происходит неравномерно и он гораздо больше, в отличие от намагниченных резцов (при равном времени работы). Вершина, главная режущая кромка и главная задняя поверхность у резцов, не обработанных импульсным магнитным полем (в отличие от обработанных по наиболее оптимальной схеме) имеют сколы и выкрашивания частиц.

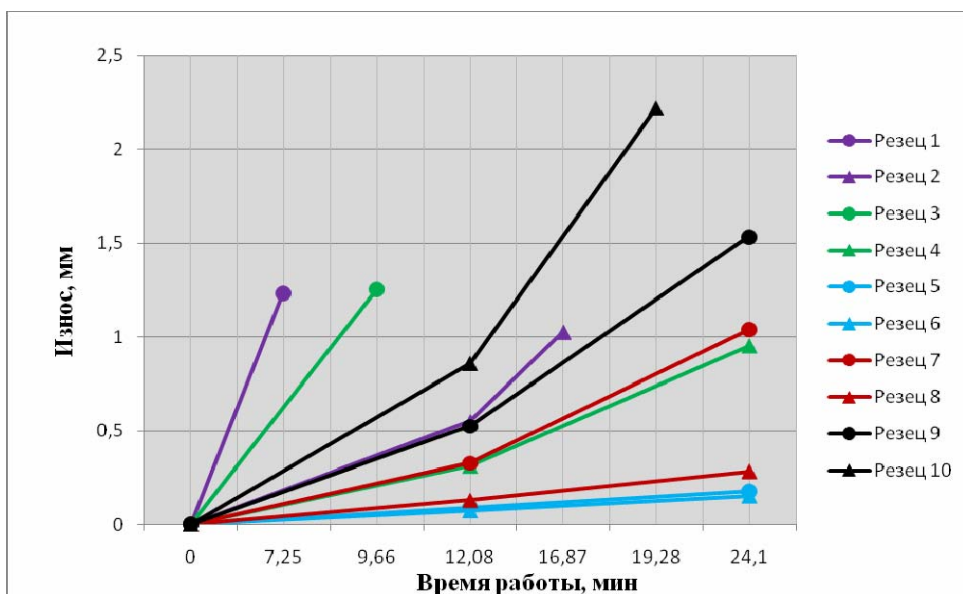


Рис. 7. Зависимость износа главной задней поверхности резца от времени работы: 1, 2 – резцы, намагниченные по схеме № 1 (без вибрации, по центру установки); 3, 4 – резцы, намагниченные по схеме № 2 (с вибрацией); 5, 6 – резцы, намагниченные по схеме № 3 (без вибрации, со стороны северной полярности установки); 7, 8 – резцы, намагниченные по схеме № 4 (без вибрации, со стороны южной полярности установки); 9, 10 – не намагниченные резцы

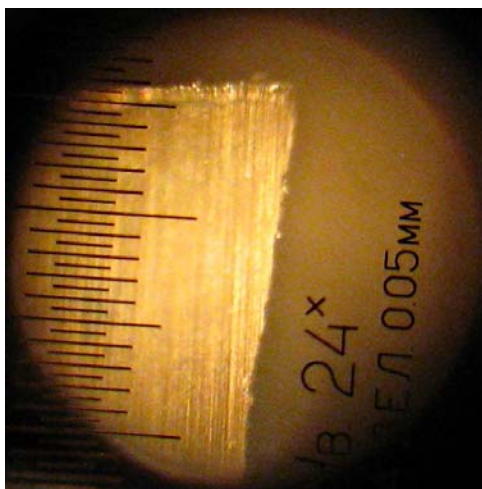


Рис. 8. Резец № 6 – намагниченный со стороны северной полярности соленоида (4,05 мТл).  
Износ = 0,152 мм. Время работы = 24,1 мин

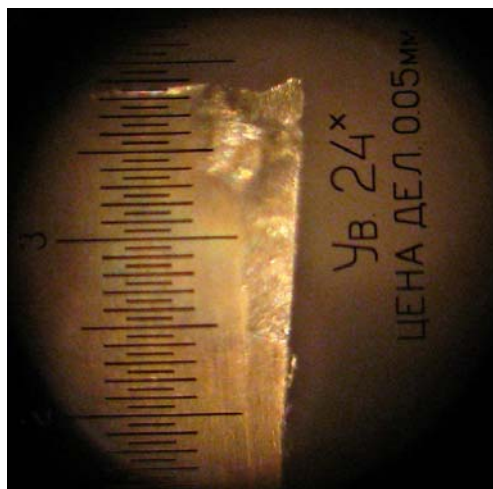


Рис. 9. Резец № 10 – не намагниченный.  
Износ = 1,534 мм. Время работы = 24,1 мин

Таким образом, стойкость намагниченных резцов в 1,5–2 раза больше, чем не намагниченных. Планируемый экономический эффект согласно ори-

ентировочным расчетам – экономия 35 % денежных средств на изготовление деталей.

# ВЕРИФИКАЦИЯ БЛОКОВ УЧЕТА ЭФФЕКТОВ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ И РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРОВ ТИПА БН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ANSYS»

А. В. Рябцов, С. А. Исхаков, В. А. Замятин, В. Б. Кайдалов

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Требования к повышению безопасности реакторных установок и увеличение периода эксплуатации топлива ведут к необходимости лучшего понимания физических механизмов явлений, проявляющихся в чехлах тепло выделяющих сборок (ТВС) из-за размерной нестабильности конструкционных материалов под действием нейтронного облучения, температуры и давления.

Из эффектов, вызванных облучением, следует выделить радиационное распухание (РР) и радиационную ползучесть (РП), причем радиационная ползучесть материала может проявиться в области низких температур, при которых тепловая ползучесть не наблюдается. Под действием этих эффектов происходит формоизменение ТВС (увеличение длины и поперечных размеров), а неравномерное распухание и температурное расширение материалов вызывает изгиб ТВС.

В настоящей работе приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния чехла ТВС с учетом эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести с использованием программного комплекса (ПК) «ANSYS» [1].

В качестве штатного материала чехлов ТВС активных зон реакторов на быстрых нейтронах (РБН) принята ферритно-мартенситная сталь ЭП-450, характеристики радиационного распухания и радиационной ползучести которой позволяют достичь высоких повреждающих доз облучения ~140 сна (выгорания топлива ~19 % т. а.) [2].

Для анализа радиационного формоизменения ТВС в ПК «ANSYS» разработаны блоки учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести материала.

## Радиационная ползучесть

Результаты внутриреакторных испытаний, а также имитационные эксперименты на ускорителях показали линейную зависимость РП от напряжений в широком интервале температур, вплоть до напряжений, равных пределу текучести материала [3]. В большинстве экспериментальных работ отмечается линейная зависимость РП от повреждающей дозы [4, 5].

Скорость деформации от радиационной ползучести записывается в виде

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^c = \sigma_{eq} \cdot B \cdot \Phi, \quad (1)$$

где  $B$  – модуль радиационной ползучести;  $\sigma_{eq}$  – эквивалентные напряжения (по Мизесу), МПа;  $\Phi$  – флюкс нейтронов.

Деформация шестигранного чехла за период одной кампании

$$\varepsilon_{eq}^c = \int_0^{\tau_k} \dot{\varepsilon}_{eq}^c \cdot d\tau, \quad (2)$$

где  $\tau_k$  – длительность кампании;  $\dot{\varepsilon}_{eq}^c$  – скорость изменения размера «под ключ».

При этом деформация ТВС вызванная термической ползучестью незначительна (не более 0,1 %), поэтому в расчетах не учитывается.

Формоизменение чехла ТВС от радиационной ползучести показано на рис. 1.

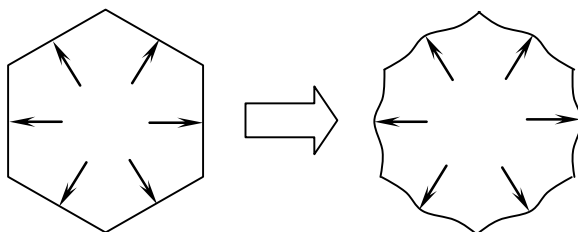


Рис. 1. Формоизменение чехла ТВС от радиационной ползучести

## Радиационное распухание

Радиационное распухание конструкционных материалов ТВС становится заметным лишь при достаточно больших радиационных повреждениях  $kt > 5$  сна.

Радиационное распухание ферритно-мартенситной стали ЭП-450 описывается зависимостью [6]

$$\Delta V/V(\%) = 0,0131 kt; \quad (3)$$

где  $kt$  – радиационные повреждения за кампанию, сна.

Изменение размера «под ключ» чехла ТВС от радиационного распухания показано на рис. 2.

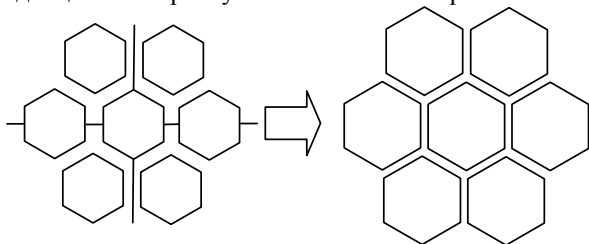


Рис. 2. Формоизменение чехла ТВС от радиационного распухания

Верификация разработанного блока учета радиационного распухания в ПК «ANSYS» проводилась при постоянном флюенсе нейтронов с учётом температурного воздействия. В качестве расчетной модели рассматривалась трехмерная конечно-элементная модель половины чехла ТВС РБН (рис. 3).

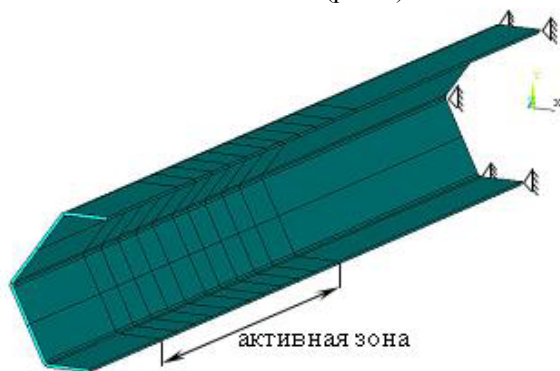


Рис. 3. Расчетная модель ТВС

Выбор типа конечного-элемента (Solid45) производился исходя из условий применения в модели эффекта радиационного распухания (swelling) и радиационной ползучести (creep) [7].

Нижний конец чехла ТВС жестко заделан в месте установки в напорный коллектор.

Плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии.

Оценка радиационного распухания осуществлялась последовательно в два этапа.

На первом этапе определялась деформация чехла, вызванная изменением температуры от 250 °С до 450 °С, а на втором этапе учитывался рост флюенса нейтронов до значения  $F = 1,9 \cdot 10^{23}$  н/см<sup>2</sup> при неизменной температуре.

Процесс тестирования блока радиационной ползучести для ПК «ANSYS» проводился на той же модели, что и тестирование радиационного распухания с учётом температурных воздействий. Исключение составляло давление, приложенное к торцу чехла ТВС. Это давление введено искусственно для тестового примера с целью определения вклада радиационной ползучести в общее деформированное состояние ТВС и прикладывалось на первом этапе нагружения совместно с температурой.

Результаты решения задачи по определению деформации шестигранного чехла ТВС, вызванной радиационным распуханием и радиационной ползучестью, с использованием ПК «ANSYS» приведены на рис. 4–5.

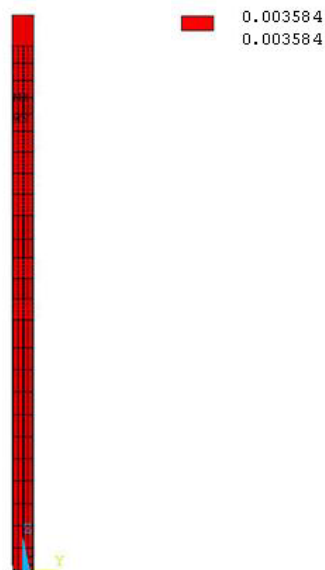


Рис. 4. Деформация, вызванная радиационным распуханием шестигранного чехла ТВС

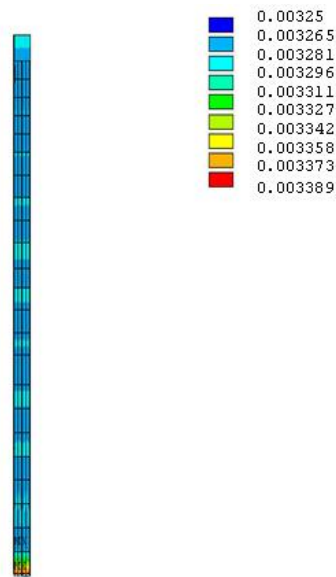


Рис. 5. Деформация, вызванная радиационной ползучестью шестигранного чехла ТВС

Результаты расчетов показали, что деформация в наиболее удаленном сечении от заделки, обусловленная радиационным распуханием, равна  $\varepsilon_{sw} = 0,003584$ , а деформация вызванная радиационной ползучестью составляет  $\varepsilon_{eq}^c = 0,003285$ . Отличие полученных результатов от решений, полученных по зависимостям (2)–(3) не превышает 0,2 %.



## Оценка искривления ТВС в результате радиационного распухания

Вследствие особенности физики реакторов на быстрых нейтронах наблюдаются неравномерные радиационные повреждения конструкционных материалов по радиусу и по высоте активной зоны.

Из-за радиального изменения флюенса в активной зоне возникает значительный градиент РР по периметру чехла. Часть чехла ТВС, обращенная к центру активной зоны, расширяется больше, вызывая искривление сборки с выпуклостью в сторону центра. Согласно экспериментальным исследованиям изгибная жесткость ТВС определяется жесткостью шестигранного чехла. Влияние пучка твэл на изгибную жесткость ТВС незначительно.

В программе «ЗОНА-М» реализована методика, позволяющая оценить искривление ТВС от РР, которая базируется на аналогии распухания с действием объемных и поверхностных сил.

Для сравнения результатов полученных по программе «ЗОНА-М» и ПК «ANSYS» рассматривалась ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 в которой повреждающая доза ближней и дальней грани составляла соответственно 62,2 сна и 41,8 сна.

В качестве расчетной модели, используемой в ПК «ANSYS», принималась трехмерная конечно-элементная модель половины шестигранного чехла ТВС РБН. На чехол воздействует флюенс нейтронов с энергией  $E > 0,1$  МэВ изменяющийся по высоте и по периметру. Основание жестко заделано, плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии (рис. 6).

Результаты расчета стрелы прогиба ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 с помощью программы «ЗОНА-М» для центральной плоскости активной зоны и сравнение с результатами полученным в ПК «ANSYS» представлены в табл. 1 и на рис. 7–8.

Таблица 1

Параметр	Зона-М	ANSYS	Отличие результатов
Стрела прогиба, мм	2,049	2,48	21 %
Отклонение головки ТВС, мм	4,581	4,541	1 %

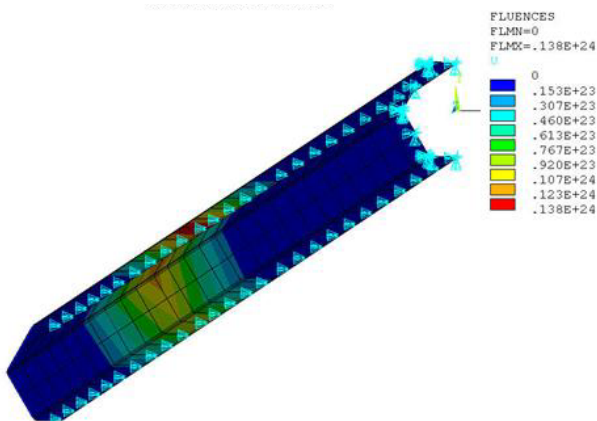


Рис. 6. Расчетная схема ТВС

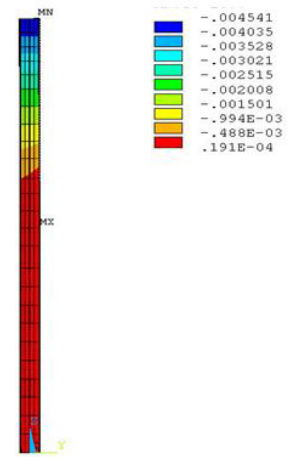


Рис. 7. Перемещение шестигранного чехла по сечению (вдоль оси Y), м

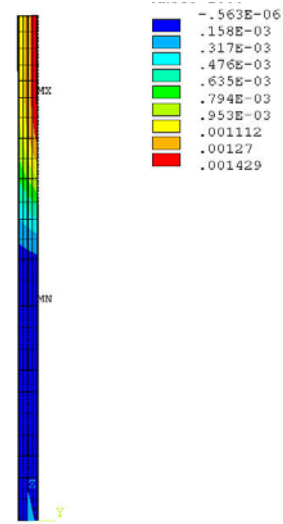


Рис. 8. Перемещение шестигранного чехла по высоте (вдоль оси Z), м

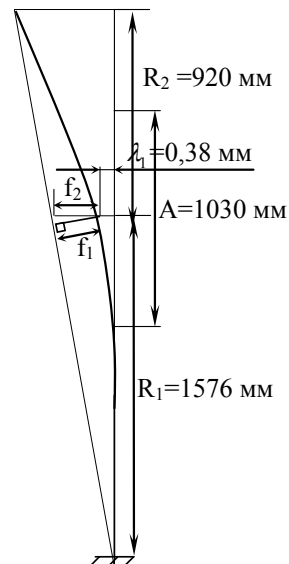


Рис. 9. Перемещение шестигранного чехла по сечению (вдоль оси Y) на уровне середины высоты активной зоны, м

Используя результаты отклонения оси шестигранного чехла ТВС на уровне центра активной зоны и уровне платиков (рис. 7) и принимая во внимание малые отклонения чехла от вертикальной оси (величины  $f_1$  и  $f_2$  практически совпадают), прогиб на уровне середины высоты топливной части составляет 2,48 мм (рис. 9).

Для проверки результатов решения определяет прогиб любого сечения ТВС аналитически.

Суммарное отклонение головки ТВС на уровне платиков составляет

$$\begin{aligned} \sum \lambda = & \int_{R_1 - \frac{A}{2}}^{R_1} \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot (z)^2}{\frac{A}{2} \cdot S} dz + \\ & + \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(\frac{A}{2}\right)^2}{\frac{A}{2} \cdot S} + \int_{R_1}^{R_1 + \frac{A}{2}} \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(2 \cdot \frac{A}{2} \cdot z - z^2\right)}{\frac{A}{2} \cdot S} dz + \\ & + \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(2 \cdot \frac{A}{2} \cdot \frac{A}{2} - \left(\frac{A}{2}\right)^2\right)}{\frac{A}{2} \cdot S}. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4) и подставив численные значения получаем, что суммарное отклонение головки ТВС на уровне платиков  $\sum \lambda = 4,61$  мм, а отклонение ТВС на уровне центра активной зоны  $\lambda_1 = 0,43$  мм.

Таким образом, отличие значения суммарного отклонения головки ТВС на уровне платиков определенного аналитически, от величин полученных с помощью ПК «ANSYS» и «ЗОНА-М» не более 2 %.

Используя аналитические результаты отклонения оси шестигранного чехла ТВС на уровне центра активной зоны и уровне платиков, прогиб на уровне середины высоты топливной части составляет 2,4808 мм. Это значение совпадает с результатом, полученным с помощью ПК «ANSYS» и отличается от величины определенной по программе «ЗОНА-М» на ~18 %.

### Сравнение результатов расчета напряженно-деформированного состояния и радиационного формоизменения ТВС РБН по ПК «ANSYS» и верифицированной программе «ЗОНА-М»

Для сравнения результатов полученных по программе «ЗОНА-М» и ПК «ANSYS» рассматривалась ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 в которой значение повреждающих доз ближней и дальней грани одинаково и равно 82 сна.

Для определения формоизменения шестигранного чехла ТВС РБН с помощью ПК «ANSYS» использовалась 1/4 часть трехмерной конечно-элементной модели (рис. 10).

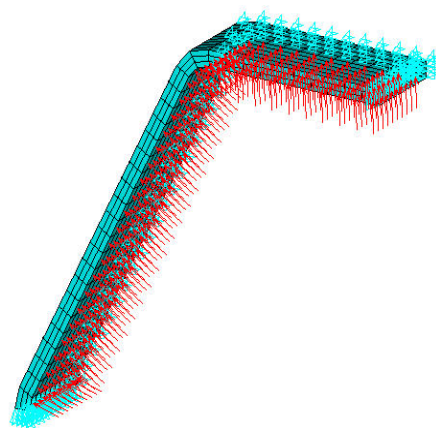


Рис. 10. Расчетная модель ТВС

Основание свободно оперто, плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии. Нагружение состоит из двух этапов аналогично тестовым примерам.

Результаты расчетов прогибов середины грани шестигранного чехла от давления, радиационного набухания и радиационной ползучести приведены на рис. 11–14 и в табл. 2.

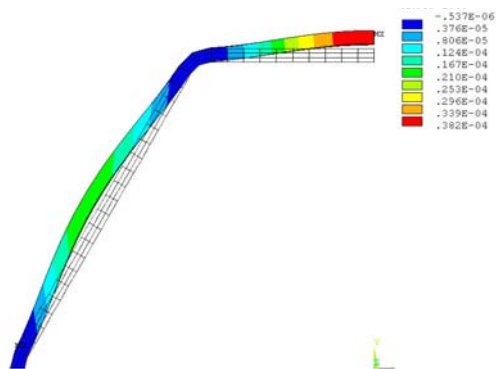


Рис. 11. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, м

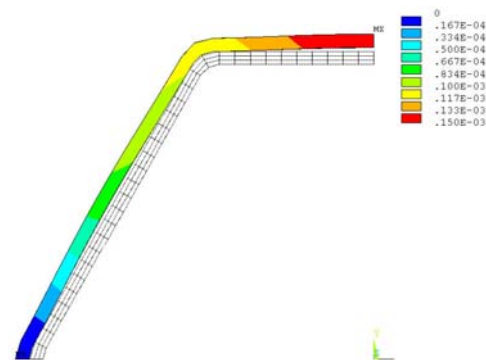


Рис. 12. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления и изменения температуры

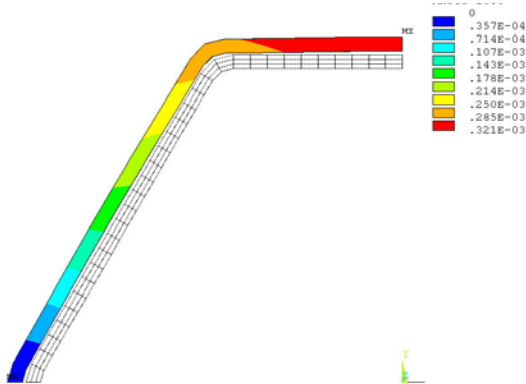


Рис. 13. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, изменения температуры с 250 °С до 450 °С и РР, м

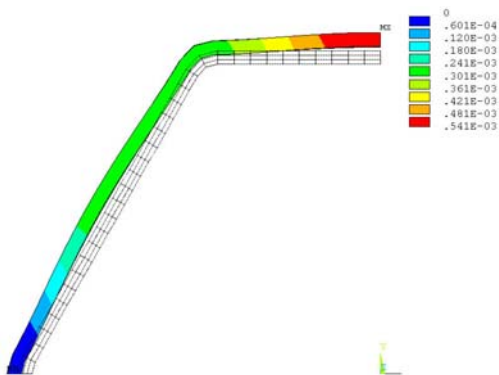


Рис. 14. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, изменения температуры с 250 °С до 450 °С, РР и РП, м

Таблица 2

Параметр	Зона-М	ANSYS	Отличие результатов
Изменение размера «под ключ» от радиационного распухания, мм	0,328	$0,171 \cdot 2 = 0,342$	4 %
Изменение размера «под ключ» от радиационной ползучести и внутреннего давления, мм	0,496	$0,253 \cdot 2 = 0,506$	2 %
Суммарное изменение размера «под ключ», мм	0,823	0,848	3 %

Для корректного сравнения результатов расчета прогибов середины грани шестигранного чехла, из значений полученных по ПК «ANSYS», исключено влияние температуры, так как программа «ЗОНА-М» температурную деформацию не учитывает. Величины прогибов полученных с помощью ПК «ANSYS» отличаются от прогибов полученных с помощью программы «ЗОНА-М» незначительно (~4 %).

Прогиб одной грани шестигранного чехла ТВС РБН с учетом температурного расширения составляет (рис. 14) 0,541 мм. Суммарное изменение размера «под ключ» равно  $0,541 \cdot 2 = 1,082$  мм, что больше

значения полученного по программе «ЗОНА-М» более чем на 30 %.

## Заключение

Реализовано решение задач радиационного распухания и радиационной ползучести ТВС РБН с использованием программного комплекса «ANSYS».

Решение тестовых примеров подтвердили корректность программной реализации физических процессов РР и РП в ПК «ANSYS».

Результаты расчета тестовых примеров отдельной ТВС, сравнение их с аналитическими решениями и результатами расчета полученными при помощи программы «ЗОНА-М» показали их хорошую сходимость.

ПК «ANSYS» обладает следующими возможностями:

- заданием трехмерных моделей произвольной формы, что позволяет использовать программу не только для расчета шестигранных чехлов ТВС РБН;
- учетом эффектов от комплексного воздействия внешних факторов (давление, температуры, нейтронного облучения) при прочностном анализе;
- возможностью расчета ансамбля сборок. Контакт может быть задан по любой из поверхностей чехла ТВС;
- удобным интерфейсом пользователя;
- большим объемом выходной информации по напряжениям, перемещениям, деформациям в любой точке заданной конструкции. Представлением результатов как в табличной форме так и в виде рисунков и графиков.

## Литература

1. ANSYS Программа «ANSYS». Регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002.
2. Чуев В. В. Поведение конструкционных материалов в спектре нейтронов быстрого реактора большой мощности. // Автореферат Заречный, 2007.
3. Забудько Л. М. и др. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоиздат, 1988.
4. Красноселов В. А. и др. Экспериментальные исследования радиационной ползучести нержавеющей сталей // Препринт НИИАР. Димитровград, 1981.
5. Gilbert E. R., Harding N. E. // Proc. Conf. Irradiation Embrittlement and Creep in Fuel Cladding and Core Components. London, 1972. p.161.
6. Асташов С. Е. и др. Основные результаты первичных исследований ТВС реактора БН-600 // В сб. Исследование конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов / Под ред. А. Г. Шейкмана. Екатеринбург, 1994.
7. ANSYS. Advanced Structural Nonlinearities. Release 7.0.

# РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

*А. А. Сазонов, И. Б. Яшанин*

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»

Элементами микросистемной техники (МСТ) называют устройства с интегрированными в объеме или на поверхности твердого тела электрическими, оптическими и микромеханическими структурами. Статическая или динамическая совокупность этих структур обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и механического движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, передачи и хранения информации, действующие в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями.

МСТ имеет приоритетное значение для обеспечения атомно-ядерных технологий, экологической безопасности, развития биотехнологии и медицинского обслуживания населения, обеспечения энергоэффективности, энерго- и ресурсосбережения, космических технологий и телекоммуникаций, транспортных, авиационных и космических систем, индустрии наносистем и материалов, безопасности и противодействия терроризму, перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.

Создаваемая в рамках направления «микросистемная техника» продукция характеризуется: инновационностью, наукоемкостью, конкурентоспособностью, потенциальной инвестируемостью на этапе разработки, массовостью производства, низкими материалоемкостью и энергоемкостью, широким рынком потребления.

В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные (сенсорные) и исполнительные (актюаторные) системы, в основе функционирования которых лежит использование классических принципов механики, оптики, электротехники и физики твердого тела.

Ежегодно мировой объем производства МЭМС вырастает на 27 %, уже сегодня он составляет 2,5 млрд. изделий в год, но доля России в мировом рынке на сегодняшний день менее 1 %.

При создании изделий микросистемной техники по технологии поверхностной микрообработки часто используются технологические процессы, применяемые в традиционной КМОП-технологии. К таким процессам, в частности, относится нанесение технологических слоев оксида кремния, поликристаллического кремния, нитрида кремния, фосфорно-силикатного стекла и других [1]. В технологии МСТ указанные материалы могут использоваться в каче-

стве структурных, жертвенных и пассивирующих слоев. Следует отметить, что требования, предъявляемые к материалам структурных и жертвенных слоев, отличаются от требований к тождественным материалам, используемым в КМОП-технологии. Так, поликремний, используемый как структурный материал в изделии МСТ, характеризуется в первую очередь механическими свойствами [2]. При изготовлении же КМОП-структуры основными становятся электрофизические параметры поликремния. Кроме того, толщина слоев, применяемых в производстве изделий МСТ, обычно в разы превышает толщину аналогичных слоев, используемых в КМОП-технологии.

Разработка методов микрообработки кремния обеспечила быстрый прогресс в области микросистем. Под термином «микрообработка кремния» подразумевается формирование механических элементов микронных размеров внутри кремниевой подложки или на ее поверхности. Существуют две технологии микрообработки кремния: объемная микрообработка, при которой элементы системы вытравливаются внутри кремниевой подложки, и поверхностная микрообработка, при которой микромеханические слои формируются из пленок, осажденных на поверхность подложки.

В ходе анализа существующих достижений в этой области оптимальными для разработки в НИИИС выбраны групповые технологии поверхностной и объемной микромеханики, как наиболее близкие к существующему в институте микроэлектронному производству.

В ходе проведенных работ консультационную поддержку оказывали сотрудники ТЦ МИЭТ (г. Зеленоград).

К настоящему моменту в НИИИС изготовлены три тестовых кристалла:

- тестовый кристалл для определения механических свойств конструкционных слоев (ТКММ102);
- тестовый кристалл для отработки технологического маршрута поверхностной микромеханики (ТКММ101);
- тестовый кристалл для отработки технологического маршрута объемной микромеханики (ТКММ501).

Механические напряжения, возникающие в процессе формирования механических структур, приводят к их деформации. Величина и направление

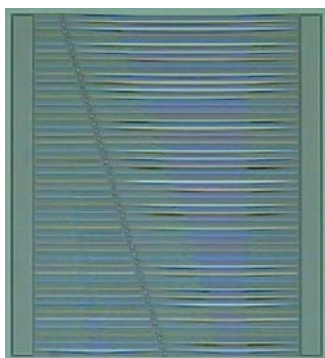


Рис. 1. Система балок ТКММ102

прогиба структур зависят от их размеров и условий формирования структурного слоя. При анализе величины деформаций можно сделать выводы, как о коррекции режимов технологических операций, так и о выборе конструкций реальных изделий МСТ с учетом ограничений, свойственных существующей технологии получения конструкционных слоев. Оценка величины деформаций может проводиться визуально (с помощью оптического микроскопа) и с использованием более точных методов (наблюдение и анализ положения интерференционных полос, использование атомно-силового микроскопа). На основании полученной информации можно рассчитать величину остаточных напряжений структурного материала.

Для определения механических свойств конструкционных слоев спроектирован тестовый кристалл ТКММ102. В его состав вошли несколько тестовых структур.

Тестовый элемент для качественной оценки залипания и остаточных напряжений при формировании балочных структур представляет собой систему балок различной длины (рис. 1). В конструкцию тестового элемента включены дополнительные опоры, назначение которых состоит в разделении балок, формируемых между основными опорами. За счет сдвига дополнительной опоры к центру соотношения длин балок, составляющих пару, постепенно изменяется. Такая конструкция позволяет обеспечить компактность тестового элемента при сохранении малого шага изменения длины балок. Длина балок изменяется от 100 до 1000 мкм с шагом 10 мкм. Ширина балок составляет 3, 5 и 8 мкм для каждой длины.

На рис. 2 изображен тестовый элемент для оценки деформаций консолей. Он представляет собой набор консолей различной длины. Длина консолей изменяется от 25 мкм до 325 мкм с шагом 5 мкм. Ширина консолей составляет 3, 5 и 8 мкм для каждой длины.

В каждом тестовом кристалле находятся наборы описанных выше структур с выступами и без выступов на нижней стороне балок и консолей. Выступы формируются для уменьшения площади контакта структур с подложкой и, как следствие, уменьшения адгезионных сил между структурами и подложкой. Такой прием используется для уменьшения количе-

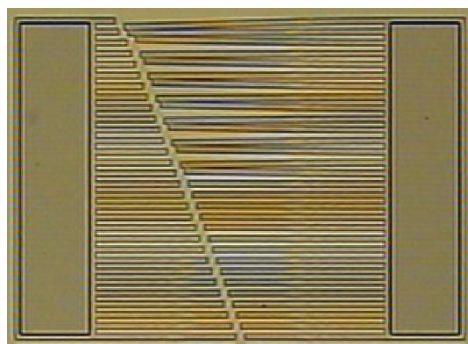


Рис. 2. Система консолей ТКММ102

ства прилипших к подложке после удаления жертвенного слоя элементов.

Процесс изготовления тестового кристалла включает 3 операции фотолитографии. На первом этапе на кремниевую подложку наносится слой оксида кремния, служащий опорой для структур (он называется опорным или жертвенным), и в нем вскрываются окна путем жидкостного химического или плазмохимического травления (рис. 3а). Затем наносится слой поликремния, из которого плазмохимическим травлением формируются механические структуры (рис. 3б). Далее жертвенный слой оксида удаляется, и на поверхности подложки образуются поликремниевые структуры, обладающие механической подвижностью (рис. 3в).

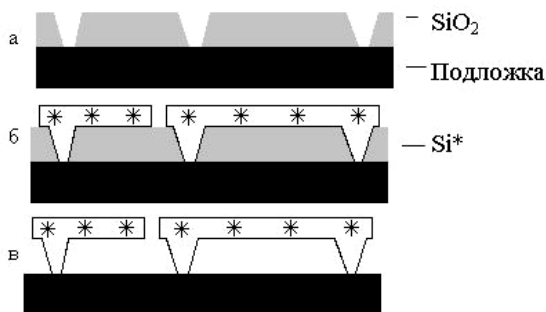


Рис. 3. Последовательность формирования слоев ТКММ102

Поликремниевая пленка имеет различное строение в объеме и в слое, граничащем с оксидом. Граничный слой имеет аморфную структуру и обладает меньшей способностью к рекристаллизации при отжиге из-за жесткой связи с  $\text{SiO}_2$ . В то время как в объеме пленки начинается рекристаллизация поликремния и верхние слои «стягиваются», граничный слой остается стабильным [3]. Это приводит к изгибу балочных структур вниз после удаления жертвенного слоя. По этой причине материалом жертвенного слоя был выбран плазмохимический оксид кремния, т. к. он обладает высокой плотностью ( $2,3 \text{ г/см}^3$ ).

Характер и величина остаточных напряжений в пленках поликремния зависят от ряда факторов: температуры и давления процесса осаждения, расхода реагента, положения пластины в реакторе и др. Влияние этих факторов исследовано эксперимен-



тально, однако установленные зависимости часто находятся в качественном и количественном противоречии. Так, например, температура перехода внутренних механических напряжений из растягивающих в сжимающие при осаждении при стандартном давлении силана 30–40 Па составляет согласно [4] приблизительно 580 °С, а согласно [5] 605 °С. Можно сделать вывод, что большинство факторов, определяющих конечные механические свойства поликремния, приводят для каждой конкретной установки осаждения к своей зависимости величины внутренних напряжений от параметров процесса. При изготовлении тестового кристалла температуру осаждения поликремния устанавливали равной 595 °С. Для снятия внутренних напряжений в поликремнии пластины отжигались в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при температуре 1150 °С.

Длина не залипших балок составила 200–700 мкм (на отдельных пластинах до 1000 мкм). Наличие выступов на нижней стороне балок также привело к значительному увеличению длины не залипших элементов (на некоторых пластинах до 2-х раз). Средняя длина не прилипших к подложке консолей составила 115 мкм.

Полученные данные будут использованы при разработке конструкций и технологических маршрутов изготовления реальных изделий, например микрокоммутаторов, которые представляют собой также балки и консоли.

Тестовый кристалл ТКММ101 представляет собой преобразователь давления. На рис. 4 изображен преобразователь давления в разрезе. Основой его конструкции является круглая поликремниевая мембрана. По периметру мембрана жестко закреплена на подложке, давление в полости между мембраной и подложкой составляет 10–30 Па. На границе рабочей области мембраны сформированы два легированных бором поликремниевых тензорезистора, которые являются чувствительными элементами преобразователя. Рядом с тензорезисторами размещены два поликремниевых резистора постоянного сопротивления. Все четыре резистора объединены в мост Уинстона.

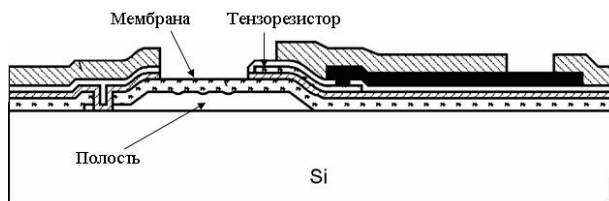


Рис. 4. Преобразователь давления в разрезе

Так как давление в полости постоянно, то при изменении внешнего давления мембрана деформируется, вместе с ней деформируются тензорезисторы и их сопротивление изменяется. Это влечет за собой разбалансирование плеч моста, и по величине разбаланса судят о величине изменения внешнего давления.

Изготовление преобразователя давления начинали с формирования жертвенного слоя. Он создавался в два этапа – сначала на пластинах выращивался термический оксид толщиной 0,6 мкм, затем на них осаждался слой CVD-SiO<sub>2</sub> толщиной 1 мкм, таким образом, суммарная толщина пленки оксида кремния составляла 1,6 мкм. Выполнялась фотолитография «Жертвенный слой», и жидкостным химическим травлением на пластинах формировался рисунок из слоя SiO<sub>2</sub>.

При изготовлении тензорезистивного датчика давления круглые островки оксида кремния, формируемые на этом этапе, должны иметь наклонные стенки. Этому удалось достичь за счет изотропности жидкостного травления, что ведет к подтравливанию под резистивную маску, а также разности скорости травления оксида кремния, осажденного из газовой фазы, и полученного методом термического окисления.

На следующем этапе пластины окислялись на глубину 500Å. Выполнялась фотолитография «Капилляры», и с помощью ЖХТ SiO<sub>2</sub> формировался рисунок капилляров.

Затем осаждался слой поликристаллического кремния толщиной 1,0 мкм. Из него выполняется чувствительный элемент датчика давления – мембрана. Для снятия внутренних напряжений поликремния проводится отжиг при  $t = 1150$  °С в течение 30 минут в атмосфере азота.

По слою поликремния выполнялась фотолитография «Окна травления», и с помощью ПХТ Si\* вскрывались окна диаметром 3 мкм, обеспечивающие доступ к «жертвенному» слою. На рис. 5 схематически изображена полученная структура.

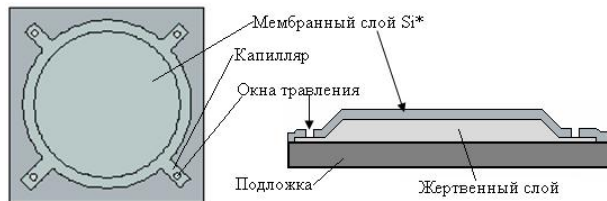


Рис. 5. Мембрана преобразователя давления

Травление жертвенного слоя проводилось в концентрированном растворе плавиковой кислоты. При подобной конструкции датчика давления скорость травления лимитируется малой толщиной капилляров и малыми размерами окон травления. По этим причинам средняя скорость продвижения фронта реакции составляет около 1 мкм/мин, в то время как скорость травления плавиковой кислотой открытой поверхности оксида кремния больше в 5–6 раз в зависимости от качества оксида.

Время травления подбиралось исходя из геометрических размеров вытравливаемых областей. На тестовом кристалле расположены мембраны с диаметрами 50, 75 и 100 мкм. Так как травление происходит от периферии к центру, то необходимое время

$$t = 0,5L_{\max}/v_{\text{тр}},$$

где  $L_{\max}$  – линейный размер наибольшей вытравливаемой области (100 мкм),  $v_{\text{тр}}$  – скорость травления (1 мкм/мин). Исходя из расчетов, время травления, достаточное для удаления слоя  $\text{SiO}_2$ , должно было составить 50 минут, что и подтвердилось на практике.

После изготовления мембран на пластинах были сформированы поликремниевые резисторы, выполнена металлическая разводка и пассивация поверхности фосфоро-силикатным стеклом. На рис. 6 изображена микрофотография преобразователя давления.

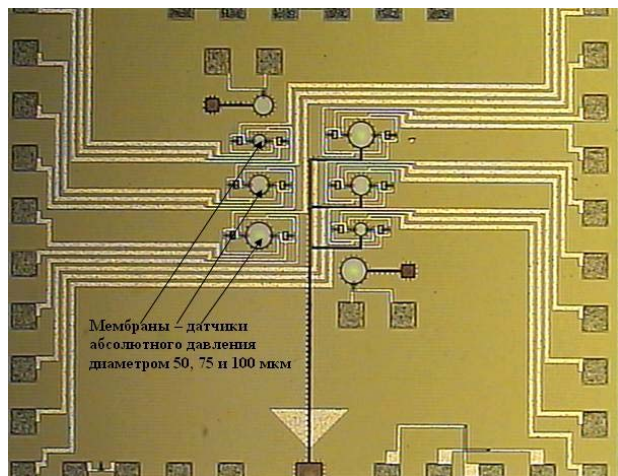


Рис. 6. Фотография тестового кристалла ТКММ101

Главной характеристикой тензорезистивного датчика давления является относительное изменение сопротивления тензорезистора при изменении давления. Согласно расчетам оно должно составлять порядка 1 % для датчиков с мембраной диаметром 100 мкм и 0,4 % для мембран диаметром 75 мкм. Нами были получены значения 0,86 % и 0,46 % соответственно. Изготовленные датчики прошли термотренировку при давлении 100–100000 Па в диапазоне температур  $-40$  –  $+80$  °С при напряжении питания 3 В. Они показали линейную зависимость выходного напряжения от давления, что является положительным результатом.

В рамках проведенных работ по технологии объемной микромеханики был изготовлен тестовый кристалл ТКММ501, в состав которого входят четыре электростатических микропривода, отличающиеся количеством гребенок (количеством конденсаторов) и способом крепления подвижной части.

На рис. 7 схематично изображен принцип действия микропривода. Он представляет собой выполненный из кремния подвижный блок 2, удерживаемый над полостью 4 за счет гибких пружин 3 и 3', соединяющих его с неподвижным элементом 1. При подаче напряжения на неподвижные элементы 1 и 1' между гребенками 5 и 5' появляется сила взаимодействия, которая вызывает их встречное движение. Подвижный элемент 2 отклоняется от исходного состояния за счет растяжения пружины 3 и сжатия

пружины 3'. После снятия заряда блок 2 возвращается в начальное положение.

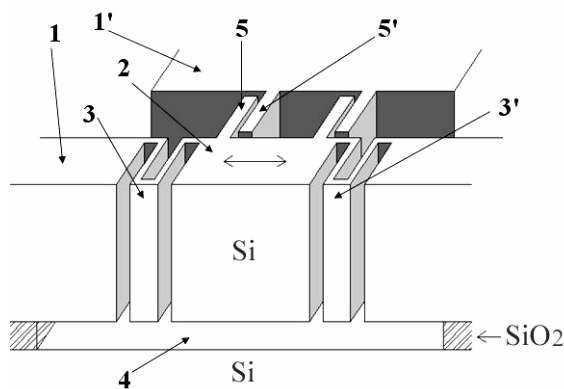


Рис. 7. Схематичное изображение и принцип действия микропривода

Подобный микропривод может быть использован для перемещения микрзеркал, замыкания/размыкания ключей, передвижения поршня и т. д.

Исходным материалом для изготовления кристаллов ТКММ501 являлись пластины КНИ с изоляционным слоем из  $\text{SiO}_2$  толщиной 5 мкм и верхним рабочим низкоомным слоем кремния толщиной 30 мкм, сопротивление которого составляет не более 0,01 Ом·см.

Обработка пластин начинается с легирования верхнего рабочего слоя кремния диффузией фосфора с целью снижения поверхностного сопротивления кремния до значения 10 Ом/□. Далее следует окисление на глубину 0,8–0,9 мкм и осаждения слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,1–0,15 мкм. Термический оксид предназначен для использования в качестве маски при глубоком анизотропном плазмохимическом травлении кремния. Слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  служит стоп-слоем при формировании защитного слоя контактных площадок.

Выполняется фотолитография «Контактные окна», и с помощью плазмохимического травления слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$  вскрываются контактные окна к кремнию. Наносится слой алюминия толщиной 1,0 мкм, проводится фотолитография «Контактные площадки», и жидкостным химическим травлением формируются контактные площадки.

На следующем этапе проводится плазмохимическое осаждение слоя  $\text{SiO}_2$ , проводится фотолитография «Защитный слой» и формируется защитный слой контактных площадок из  $\text{SiO}_2$ .

Фотолитографией «Структура» формируется рисунок структуры микродвигателя и проводится плазмохимическое травление  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$  до кремния.

Затем производится анизотропное плазмохимическое травление кремния на глубину 30 мкм. Стоп-слоем при травлении служит жертвенный слой толщиной 5. При травлении стравливается верхний слой



$\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,1–0,15 мкм и частично слой  $\text{SiO}_2$ . На рис. 8 приведена фотография микропривода.

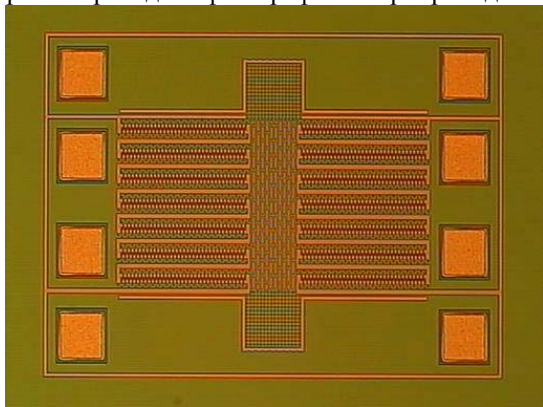


Рис. 8. Фотография микропривода

После этого проводится резка пластин на кристаллы, и жертвенный слой вытравливается в концентрированном водном растворе плавиковой кислоты.

Изготовленные микроприводы имеют амплитуду перемещения порядка 5–10 мкм.

Таким образом, в НИИИС разработаны два базовых технологических маршрута изготовления микроэлектромеханических систем – поверхностной и объемной микрообработки, которые при их незначительном изменении позволяют производить широкий

спектр изделий, входящих в номенклатуру изделий для первоочередной разработки и постановки на производство в НИИИС: акселерометры, датчики угловых скоростей, датчики давления, коммутационные изделия, инклинометры и двигатели.

## Литература

1. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18–24.
2. Распопов В. Я. Микромеханические приборы // Учебное пособие. Тул. гос. университет: Тула, 2002.
3. Годовицын И. В., Шелепин Н. А., Лыженкова Г. А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния // Известия вузов. Электроника. 1997. № 2. С. 49–54.
4. Siegowcki S., Christenson T. et al. The application of fine-grained tensile polysilicon to mechanically resonant transducers. Sensors and Actuators. 1990. Vol. 21–23. P. 346–351.
5. P. Krulesitch, R. Howe, G. Johnson et al. Stress in undoped LPCVD polycrystalline silicon. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. June 1991. P. 957–960.

# ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ВОЛЬФРАМА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

А. А. Аушев, В. С. Дрожжин, М. Д. Куваев, С. А. Куликов, И. В. Пикулин, Н. Н. Попов, В. И. Пухова, О. Н. Романова, Г. Ю. Самсонов, А. Н. Ховрин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В последнее время особый интерес вызывают материалы с нано-кристаллической структурой. Это обусловлено возможностью значительной модификации и даже принципиального изменения свойств известных материалов при переходе в наноструктурное состояние. Довольно распространенным способом получения таких материалов является компактирование нанодисперсных порошков с последующим спеканием. Одним из способов получения таких порошков является механическая обработка промышленных порошков микронных размеров на высокоэнергичных мельницах.

В докладе представлены исследования процессов получения нанодисперсного порошка вольфрама на планетарной мельнице МПЛ-3. В экспериментах представленных в докладе исследовалось влияние на процесс измельчения следующих факторов: коэффициента заполнения мелющей гарнитурой объема размольного барабана, наличия дисперсионной среды, ее вида и количества, коэффициента нагрузки на измельчаемый материал. Результаты экспериментов определялись по изменению удельной поверхности порошка, которая измерялась БЭТ методом на газовом хроматографе ГХ-1. Изучение изменения формы и состояния частиц порошка проводилось на электронном микроскопе MIRA LMU. В результате экспериментов получен нанодисперсный порошок вольфрама с удельной поверхностью 7,19 м<sup>2</sup>/г, состоящий из агломерированных частиц. Частицы имеют слоистую или чешуйчатую форму. Данная технология не позволяет получать частицы сферической формы.

## 1. Технические характеристики основного оборудования

Исследование процессов получения нанодисперсного порошка вольфрама, описанное в данной работе, проводилось на мельнице планетарной лабораторной МПЛ-3. Фотография мельницы приведена на рис. 1. Технические характеристики мельницы МПЛ-3 представлены в табл. 1.



Рис. 1. Фотография центробежной планетарной мельницы МПЛ-3

Таблица 1  
Технические характеристики мельницы МПЛ – 3

№	Наименование параметра	Размерность	Значение параметра
1	Установленная мощность электродвигателя	кВт	4
2	Количество барабанов	шт	3
3	Диаметр барабана	мм	110
4	Длина барабана	мм	140
5	Объем барабана	л	1,33
6	Скорость вращения водила (макс.)	об/мин	518
7	Скорость вращения барабанов (макс.)	об/мин	1036
8	Центробежный фактор	-	30g
9	Масса	кг	220
10	Габаритные размеры (LxVxH)	мм	860x680x505

Мельница представляет собой 3-х барабанный планетарный механизм общего назначения с регулируемой скоростью вращения редуктора и заданным соотношением скорости вращения водила и барабанов. Регулировка осуществляется в пределах от 10 до 518 об/мин. Измельчение материала происходит в помольных барабанах под воздействием мелющих тел (стальные шары диаметром 9 мм) за счет много-

кратного повторения циклов удара и истирания в центробежном поле. Направления вращения водила и барабанов встречные (рис. 2). Мелющие тела поднимаются вместе со стенкой барабана до определенного момента, когда они под действием центробежной силы отрываются от поверхности барабана и движутся к противоположной стенке барабана, ударяясь друг о друга и о противоположную стенку барабана. В результате такого характера движения мелющих тел и материала достигается высокая степень размола.

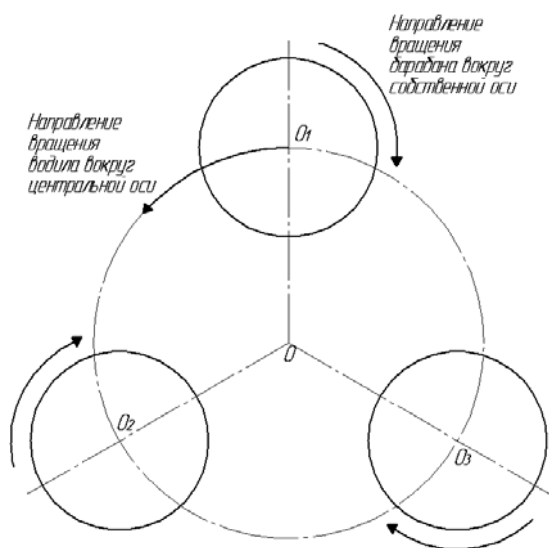


Рис. 2. Кинематическая схема планетарного механизма мельницы МПЛ-3

## 2. Влияние коэффициента заполнения на степень измельчения

Существенное влияние на процесс измельчения оказывает характер движения мелющей гарнитуры в барабанах мельницы [1, 2, 3], который зависит от коэффициента заполнения, т. е. от того, какой объем занимает мелющая гарнитура по отношению к объему барабана. В литературе выделяют три вида движения мелющей гарнитуры в барабанах мельницы [2].

При небольших коэффициентах заполнения (10–20 %) происходит «конденсация» шаров на стенке барабана, в наиболее удаленной точке от центра планетарного механизма, где они совершают качение. Движение шаров схематически показано на рис. 3а. Когда основная масса шаров катится по стенке барабана, шары, находящиеся на краю скопления, перебрасываются на противоположный край. При этом материал в основном испытывает истирающие нагрузки.

При увеличении коэффициента заполнения до 40–50 % шары также движутся скоплением, происходит их каскадный перенос с одного на другой край скопления, как это показано на рис. 3б. При этом материал в основном испытывает ударные нагрузки.

При значениях коэффициента заполнения > 55 % начинает проявляться эффект «растекания», заключающийся в образовании замкнутого слоя шаров вдоль стенки барабана, практически неподвижного относительно нее. Оставшаяся же, часть шаров совершает движение в пространстве, ограниченном этим слоем, как это представлено на рис. 3в. При таком характере движения в процессе механоактивации участвуют только шары, не входящие и пристеночный слой.

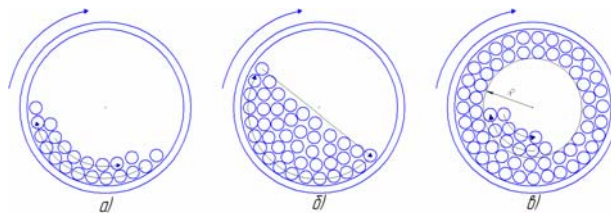


Рис. 3. Схематическое представление движения шаров при малых (10–20 %) (а), средних (40–50 %) (б) и больших (> 55 %) (в) значениях коэффициента заполнения

Для проведения экспериментов использовался вольфрамовый порошок ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» выпущенный по ТУ СТП 00196144-071,3-2004. Средний размер частиц согласно ТУ составляет 1,15–1,65 мкм.

Для подтверждения влияния коэффициента заполнения были проведены эксперименты № 1 и № 2 при 25 % и 48 % значениях коэффициента заполнения. Результаты измерений удельной поверхности представлены на рис. 4.

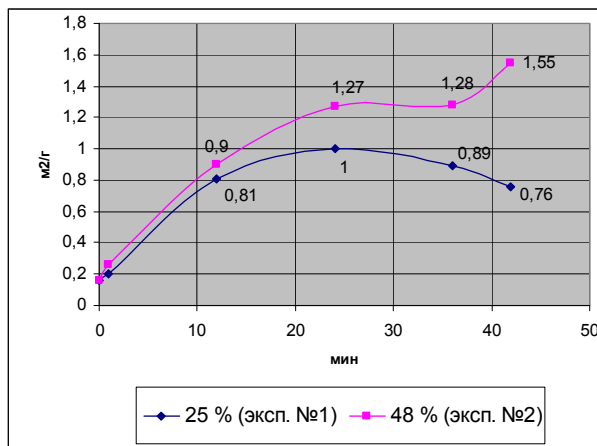


Рис. 4. Изменение удельной поверхности порошка в зависимости от времени измельчения при различных коэффициентах заполнения

Из результатов представленных на графике можно сделать вывод, что более интенсивное измельчение идет при коэффициенте заполнения в 48 %, чем при 25 %. При коэффициенте в 25 % график имеет рост до 24 минуты измельчения, а затем начинает уменьшаться. Это связано с образованием агломератов.

### 3. Влияние дисперсионной среды на степень измельчения

Большое влияние на процесс измельчения оказывает введение дисперсионной среды. Систематические исследования действия дисперсионных сред на процесс измельчения проведены Ходаковым [5]. В результате было установлено, что измельчение твердых тел в дисперсионных средах может приводить к многократному увеличению удельной поверхности по сравнению с измельчением на воздухе.

Понижение прочности твердых тел в присутствии дисперсионной среды объясняется эффектом Ребиндера [4, 5]. Изменение свойств материала под влиянием поверхностно-активных веществ обусловлено снижением свободной поверхностной энергии и, как следствие, уменьшением работы, необходимой для увеличения поверхности [4]. При деформации твердого тела в его поверхностном слое развиваются клиновидные микротрещины, способные смыкаться после снятия нагрузки. Пленки жидкости препятствуют их смыканию и оказывают на них расклинивающее действие, которое в случае очень узких щелей заметно способствует их расширению [5]. Дисперсионная среда применяемая при измельчении, не должна вызывать никаких изменений частиц дисперсной фазы, например, их растворения или набухания; не должна быть агрессивной и не должна вступать в химическую реакцию с частицами; должна хорошо смачивать частицы; в дисперсионной среде не должны образовываться агрегаты частиц [6].

Анализ литературных данных показывает [4, 5], что при измельчении порошков в качестве дисперсионных сред чаще всего используют: воду, спирт, толуол, ацетон. В экспериментах описанных в данной работе в качестве дисперсионных сред были использованы этиловый спирт и толуол. Вода не была использована вследствие ее окислительных свойств (окисление размольной гарнитуры и стенок помольных барабанов). Увеличение интенсивности измельчения в присутствии дисперсионной среды может происходить при различных относительных количествах

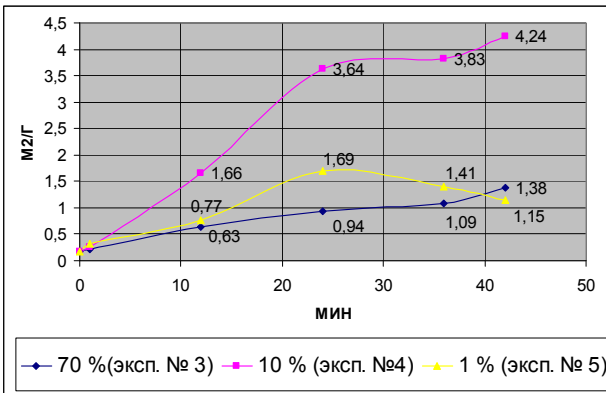


Рис. 5. Изменение удельной поверхности порошка в зависимости от времени измельчения в присутствии этилового спирта в качестве дисперсионной среды

среды [5]. Поэтому были проведены эксперименты № 3, 4, 5 по измельчению вольфрамового порошка в присутствии дисперсионной среды – этилового спирта в количестве 1 %, 10 % и 70 % от массы измельчаемого порошка. Результаты измерений удельной поверхности представлены на рис. 5.

Из результатов представленных на графике видно, что измельчение идет более эффективно при добавлении дисперсионной среды в количестве 10 % от массы измельчаемого порошка, чем при добавлении 70 % и 1 %.

Для сравнения дисперсионных свойств спирта и толуола был проведен эксперимент № 6 по измельчению порошка вольфрама при добавлении в качестве дисперсионной среды толуола в количестве 10 % от массы измельчаемого порошка. Результаты измерений удельной поверхности представлены на рис. 6.

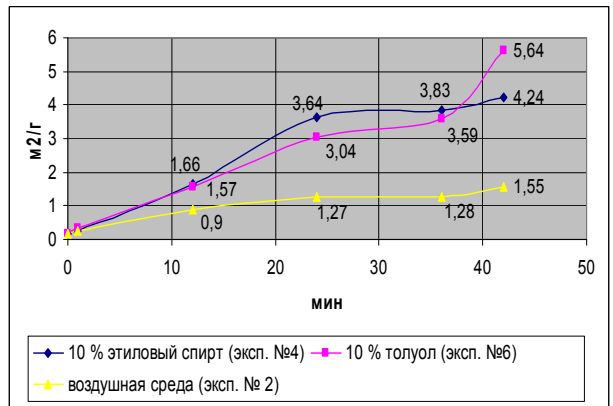


Рис. 6. Изменение удельной поверхности порошка вольфрама в зависимости от времени измельчения в различных дисперсионных средах

Из результатов представленных на графике видно, что до 36 минуты интенсивность увеличения удельной поверхности в присутствии дисперсионных сред спирта и толуола примерно одинакова, причем в присутствии спирта удельная поверхность достигнута большая. Но после 36 минуты интенсивность увеличения удельной поверхности в присутствии толуола возросла. К 42 минуте при использовании толуола достигнута удельная поверхность большая, чем при использовании этилового спирта, ( $S_{\text{толуол}} = 5,64 \pm 0,31 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $S_{\text{спирт}} = 4,24 \pm 0,23 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

### 4. Влияние коэффициента нагрузки на измельчаемый материал на степень измельчения

Еще одним фактором, влияющим на интенсивность измельчения, является коэффициент нагрузки на измельчаемый материал, который равен отношению массы измельчаемого порошка к массе размольной гарнитуры. Изменив значение коэффициента нагрузки на материал можно изменить удельную энергию воздействия на единицу массы порошка, а чем выше энергия воздействия, тем выше интенсив-



ность измельчения порошка. В экспериментах описанных выше значение коэффициента нагрузки было равно 1/15. Для проверки влияния значения коэффициента нагрузки на интенсивность измельчения был проведен эксперимент № 7 со значением коэффициента нагрузки, равном 1/30. Результаты измерений удельной поверхности представлены на рис. 7.

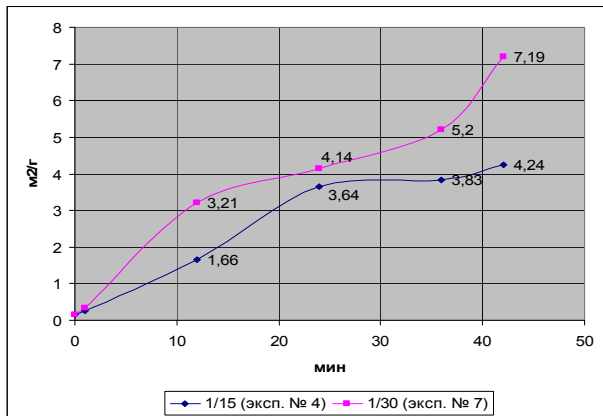


Рис. 7. Изменение удельной поверхности порошка в зависимости от времени измельчения при различных коэффициентах нагрузки на материал

Анализируя данные представленные на графике можно сделать вывод, что измельчение идет эффективней при коэффициенте нагрузки на материал, равном 1/30. Наилучший результат получен при

42 минутах измельчения – 7,19 м<sup>2</sup>/г. Причем этот результат является лучшим для всех экспериментов.

## 5. Электронно-микроскопный анализ полученных порошков

Изучение изменения формы и размеров частиц в процессе сухого размолта проведено на порошках полученных во втором эксперименте (сухой размол, 48 %) с использованием электронно-микроскопного анализа. На рис. 8, 9 приведены изображения частиц порошка вольфрама: исходного, после размолта в течение 42 мин.

Исходный порошок вольфрама имеет ярко выраженную кристаллическую структуру: частицы имеют плоские грани, прямолинейные ребра и одинаковые углы между соответствующими гранями. Некоторые частицы порошка имеют общие грани. В отдельных частицах порошка встречаются поры (рис. 8).

Измельченный порошок (рис. 9) состоит из агрегатов частиц, которые образованы из размолотых частиц и единичных исходных частиц. Такие частицы идентифицируются по форме и характерным порам. Поверхность частиц – шероховатая, с характерным размером 30–50 нм.

Изображения частиц порошка вольфрама полученных в эксперименте № 7 в дисперсионной среде этилового спирта (10 %), представлены на рис. 10 и 11.

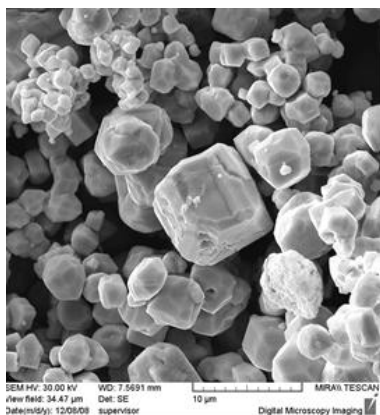


Рис. 8. Изображения частиц исходного порошка вольфрама

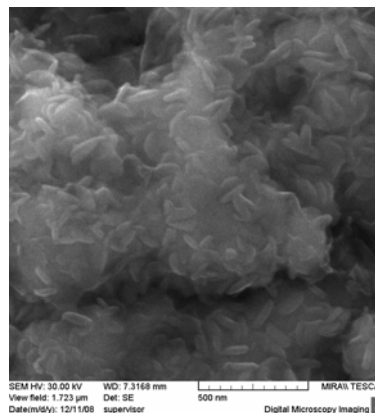
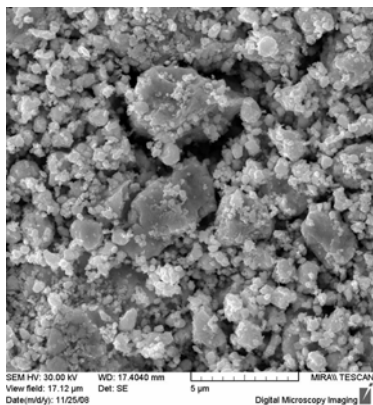


Рис. 9. Изображения измельченного в течение 42 мин. порошка вольфрама (эксп. № 2)

После обработки в течение 1 мин происходят изменения в форме и размерах исходных частиц. На поверхности частиц образуются топографически разделяемые участки (области) размером от ~100 нм и выше. После 12 минут размолла происходит образование пластинчатых частиц. Минимальный размер топографически разделяемых образований на поверхности частиц – около 50 нм. После 24 минут размолла происходит формирование крупных агрегатов частиц. Минимальный размер топографически разделяемых образований на поверхности частиц – около 25 нм.

После 42 минут обработки сформировались крупные агрегаты частиц, состоящие из более мелких агрегатов и отдельных частиц. Минимальный размер топографически разделяемых образований на поверхности частиц – около 20 нм.

Размол с использованием дисперсионной жидкости изменил характер диспергирования: частицы имеют другой вид – слоистую или чешуйчатую форму (рис. 10–11).

Анализ фотографий, полученных на электронном микроскопе, показал, что с увеличением времени обработки помимо размолла происходит агрегирование материала – формирование более крупных агломератов, состоящих из мелких отдельных частиц.

## 6. Определение содержания примесей методом микрорентгеноспектрального анализа

В процессе получения нанодисперсного материала на мельнице МПЛ-3 может происходить загрязнение обрабатываемого материала составляющими размольной гарнитуры. Определение загрязняющих элементов осуществлялось методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа.

Содержание Fe в порошках вольфрама, полученных в экспериментах № 3, 4, 6, 7 после обработки в дисперсионных средах, представлено в табл. 2. Для ряда образцов было определено содержание хрома в связи с тем, что футеровка барабана и мелющая гарнитура выполнена из нержавеющей стали.

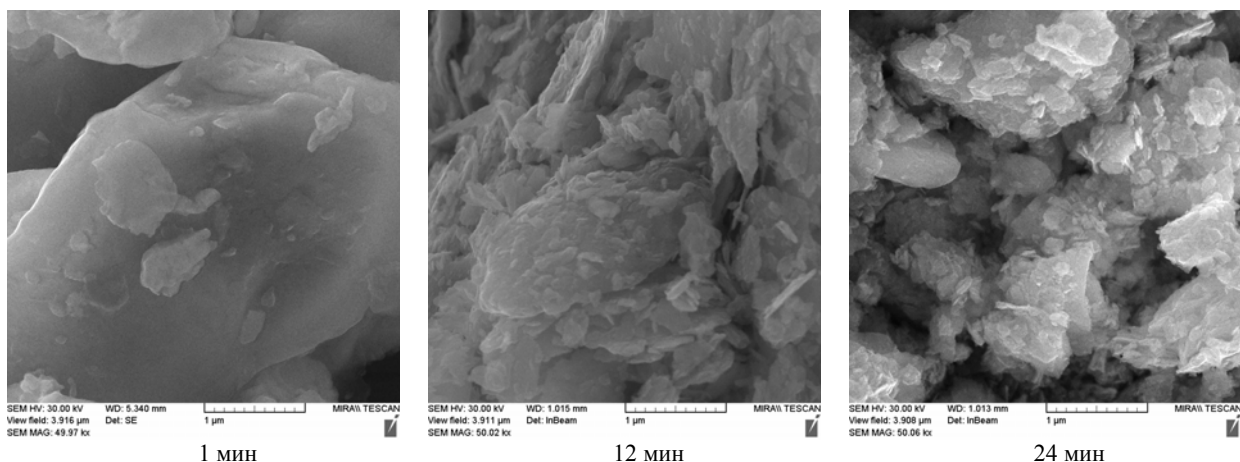


Рис. 10. Изображения частиц порошков вольфрама, полученных в эксперименте № 7, обработанных в течение 1, 12 и 24 мин в дисперсионной среде этилового спирта (10 %), при коэффициенте нагрузки 1/30

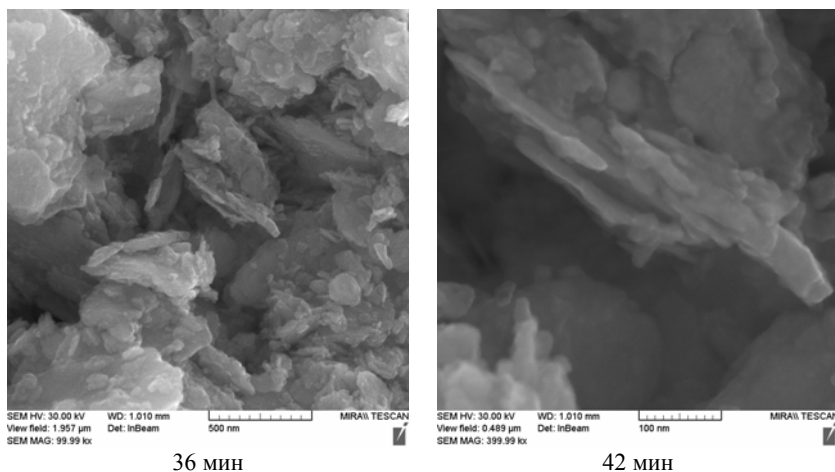


Рис. 11. Изображения частиц порошков вольфрама, полученных в эксперименте № 7, обработанных в течение 42 мин в дисперсионной среде этилового спирта (10 %), при коэффициенте нагрузки 1/30

Таблица 2  
Содержание примесей в порошках вольфрама,  
полученных в экспериментах № 3, 4, 6, 7

Время, мин	Массовое содержание, %	
	Fe	Cr
эксп. № 3 (70 % этиловый спирт, 48 %, 1/15)		
24	5,8	0,7
36	7,0	1,0
42	7,0	0,9
эксп. № 4 (10 % этиловый спирт, 48 %, 1/15)		
24	0,8	0,1
36	1,4	0,2
эксп. № 7 (10 % этиловый спирт, 48 %, 1/30)		
1	1,1	-
12	1,9	0,2
24	3,4	0,4
36	5,7	0,9
42	5,6	0,8
эксп. № 6 (10 % толуол, 48 %, 1/15)		
24	1,7	-

По результатам электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа характерным для всех видов размол является намол железа, который может быть в пределах 7 масс %, что, в первую очередь, связано со временем обработки. Вторым фактором, влияющим на намол железа, может быть дисперсионная среда.

### Заключение

Проведенные эксперименты показали, что наилучшими технологическими условиями для получения нанодисперсного порошка вольфрама на планетарной мельнице МПЛ-3 является измельчение

в присутствии дисперсионной среды в количестве 10 % от массы измельчаемого порошка, при коэффициенте заполнения равном 48 %, и при коэффициенте нагрузки на измельчаемый материал равном 1/30. В результате экспериментов получен нанодисперсный порошок вольфрама с удельной поверхностью 7,19 м<sup>2</sup>/г, состоящий из агломерированных частиц. Частицы имеют слоистую или чешуйчатую форму. Данная технология не позволяет получать частицы сферической формы.

### Литература

1. Шелехов Е. В., Свиридова Т. А. Моделирование движения шаров в планетарной мельнице. Влияние режимов обработки на продукты механоактивации смеси порошков Ni и Nb // *Материаловедение* 1999. № 10. С. 17–21.
2. Черданцев В. В., Пустов Л. Ю., Калашин С. Д., Томилин И. А., Шелехов Е. В. Расчет энергонапряженности и температуры в планетарном механоактиваторе // *Материаловедение*, 2000. № 2. С. 18–23.
3. Черданцев В. В., Пустов Л. Ю., Калашин С. Д., Томилин И. А., Шелехов Е. В. Расчет энергонапряженности и температуры в планетарном механоактиваторе (продолжение) // *Материаловедение*, 2000. № 3. С. 22–26.
4. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов. Сиб. отд. изд-ва. «Наука», 1986.
5. Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: «Наука», 1972.
6. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1974.



# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. В. Смагин, Р. П. Шумейкин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва

В настоящее время применение современного программного обеспечения, такого как ANSYS, NASTRAN и т. д., позволяют проводить расчеты собственных частот и форм колебаний конструкции, и многие инженеры стараются проводить предварительную оценку до проведения реальных вибрационных испытаний конструкции. Опыт проведения подобных расчетов показывает, что при последующих испытаниях значения собственных частот получается несколько ниже, чем значения, полученные при расчетах.

Данная работа посвящена разработке подходов позволяющих повысить адекватность расчетных моделей и точность получаемых собственных частот и форм колебаний конструкции. Рассматривается методика определения контактных поверхностей при модальном анализе, влиянии различных факторов на собственные частоты, результаты модельных расчетов и прочее.

На первый взгляд модальный анализ достаточно прост по сравнению с прочностными расчетами, т. к. в нем нет учета нелинейных свойств, как геометрии, так и свойств материала и нет необходимости прикладывать внешние нагрузки. Однако существуют нюансы по созданию конечно-элементной модели, которая, помимо соответствия модели массово – габаритным и жесткостным свойствам, должна корректно учитывать резьбовые соединения и контактные поверхности стыков деталей в конструкции.

В связи с тем, что при модальном анализе невозможно учитывать нелинейное поведение конструкции, то при задании контактных поверхностей (которые вносят нелинейный вклад в поведение конструкции) происходит «слипание» двух контактирующих деталей в зоне контакта таким образом, что при деформации конструкции контактирующие поверхности в любом случае остаются сомкнутыми, что повышает жесткость конструкции. Таким образом, можно выдвинуть гипотезу: **на собственные частоты и формы существенное влияние оказывают задаваемые при создании КЭМ контактные поверхности.**

Для подтверждения данной гипотезы были проведены расчеты на примере простой конструкции, общий вид конструкции и конечно-элементная модель показаны на рис. 1.

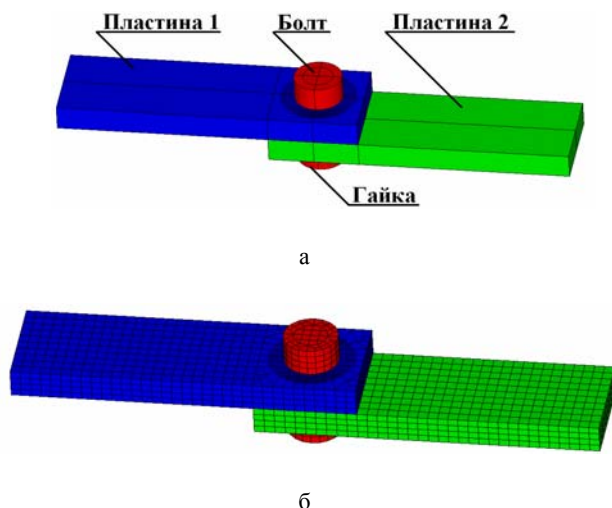


Рис. 1. Модель болтового соединения:  
а – общий вид конструкции,  
б – конечно-элементная модель

Конструкция представляет собой две пластины соединенные между собой болтовым соединением. По торцевым поверхностям пластины жестко закреплены. При этом заданы следующие контактные пары: «головка болта – пластина 1», «гайка – пластина 2» и «пластина 1 – пластина 2». Контактные пары показаны на рис. 2.

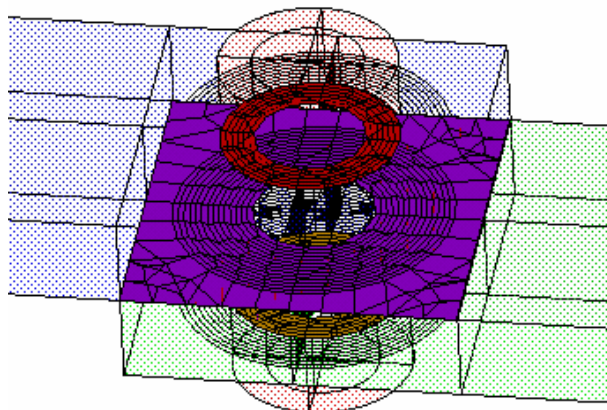
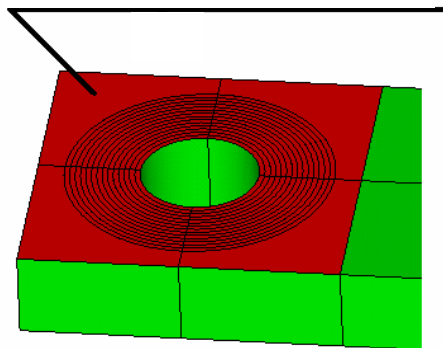


Рис. 2. Контактные пары

Поверхность А



Поверхность Б

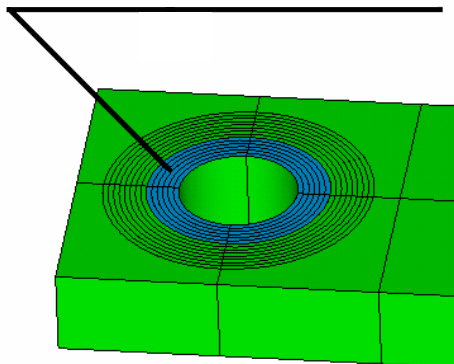


Рис. 3. Поверхности контакта

Для подтверждения выдвигаемой гипотезы проведем два расчета (рис. 3): в первом случае контакт между пластинами 1 и 2 происходит по поверхности А, во втором по поверхности Б.

Результаты расчета приведены в таблице. Как видно из таблицы в первом расчетном случае (контакт по поверхности А) значения собственных частот получились выше, чем во втором, при этом разница составила до 30 %. Это подтверждает выдвинутую гипотезу о увеличении жесткости конструкции с увеличением площади контактных пар.

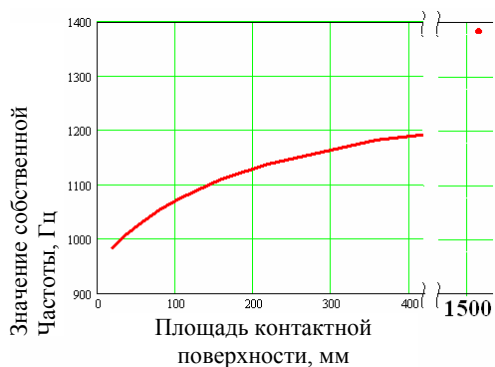
Результаты расчета

Номер собственной формы колебаний	Значения собственной частоты при контакте по поверхности А	Значения собственной частоты при контакте по поверхности Б	Разница, %
1	1367	1032	24
2	3004	2778	8
3	4402	3009	32
4	4577	4349	5
5	9291	6126	34

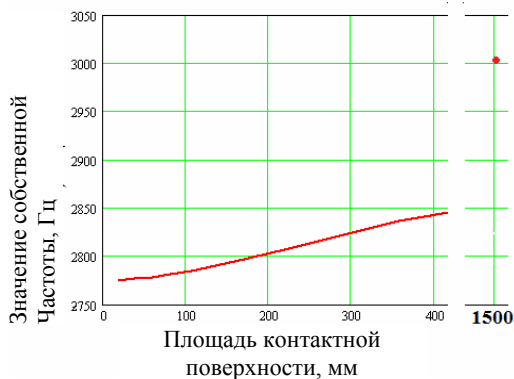
Для определения влияния площади контактной поверхности была проведена серия расчетов с постепенным увеличением площади контакта от поверхности  $n_1$  до  $n_i$ . Результаты расчета показаны на рис. 4. На графиках приведено изменение собственных частот при увеличении площади контактной поверхности между пластинами 1 и 2. Как видно из графиков разница в значениях собственных частот может достигать 20 %. Если назначить контакт по всей поверхности соприкосновения, то разница составит 40–50 %.

Таким образом, правильный выбор площади контактной поверхности повышает точность расчета при модальном анализе.

Предлагается определять площадь контактной поверхности для пары «пластина 1 – пластина 2» на основе распределения контактных напряжений, возникающих в пластинах от усилия затяжки резьбового соединения. Из теории известно, в болтовом соединении под головкой болта происходят деформации деталей, и образуется так называемый «конус давления», подробно на нем останавливаться не будем, так как он описан в работах различных авторов, например, в книге Биргера И. А. «Расчет резьбовых соединений». Согласно данным, которые были подтверждены экспериментальными исследованиями, образующая конуса давления составляет с осью болта угол 20–30°.

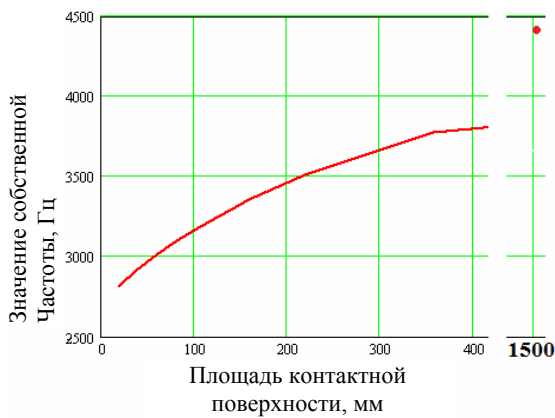


а) 1-я собственная форма колебаний

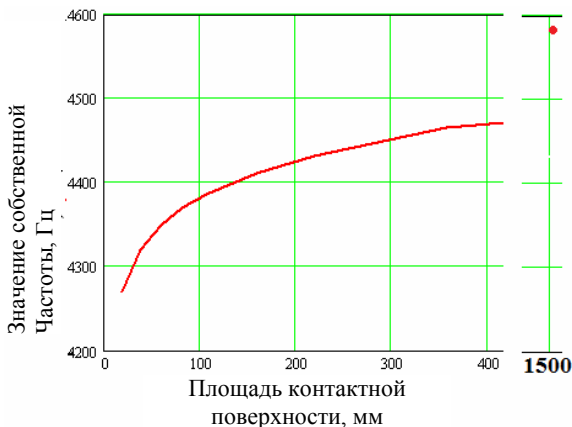


б) 2-я собственная форма колебаний

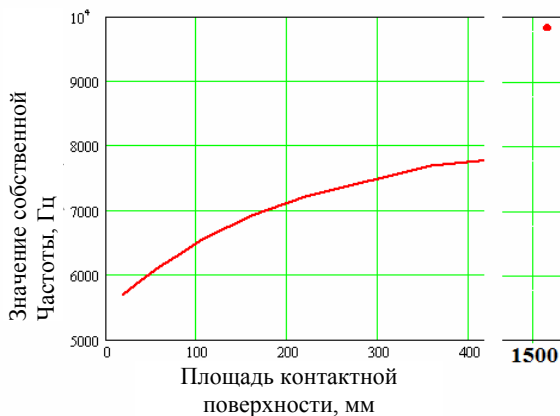
Рис. 4. Рост собственной частоты колебаний при увеличении площади контактной поверхности



в) 3-я собственная форма колебаний



г) 4-я собственная форма колебаний



д) 5-я собственная форма колебаний

Рис. 4. Окончание

Для проверки был проведен расчет НДС конструкции возникающего при затяжке болтового соединения. При этом было получено, что конус давления качественно не меняется в зависимости от усилия затяжки (угол наклона образующей  $\sim 23^\circ$ ), а изменяется только величина контактного давления. Результаты расчета приведены на рис. 5.

Таким образом, по результатам расчета можно определить площадь контактной поверхности, которую необходимо задавать при модальном анализе.

Далее площадь контактной поверхности, получаемая через конус давления, будем называть «**главной поверхностью**», а соответствующую ей собственную частоту конструкции – «**главной частотой**».

Расчет самого конуса давления с использованием МКЭ достаточно прост и создав один раз параметрическую модель резьбового соединения, возможно получать конус давления и назначать размеры главной поверхности для различных геометрических размеров и материалов в резьбовом соединении.

В то же время следует отметить, что при модальном анализе нет необходимости моделировать усилие затяжки, в том случае, если затяжка резьбовых элементов удовлетворяет следующим критериям:

- обеспечивается плотность стыка при действии внешних нагрузок. Условия нераскрытия стыка определяются по формулам деталей машин;

- не приводит к изменению жесткости конструкции. Т. е. затяжка болтового соединения (область А) изменяет НДС конструкции только в локальной зоне и не приводит к изменению НДС во всей конструкции (области Б и В) (рис. 6).

Если пластины будут разнесены между собой и затем стянуты (рис. 7), то очевидно, что в данном случае затяжка будет оказывать существенное влияние на собственные частоты конструкции.

Рассмотрим более распространенный тип конструкции – круглая пластина, опертая по кольцу и закрепленная при помощи  $n$ -го количества болтов. Общий вид конструкции приведен на рис. 8.

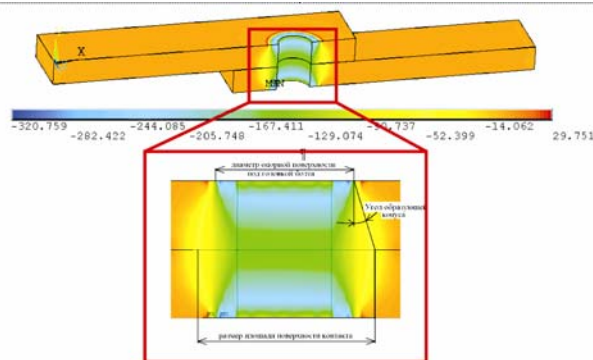


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние, вызванное затяжкой болтового соединения

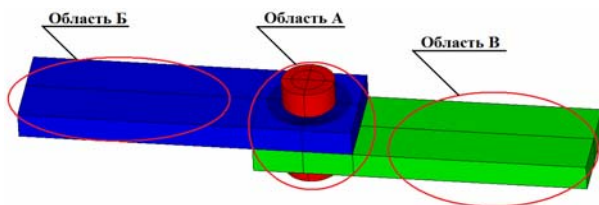


Рис. 6. Пример конструкции с изменением НДС в локальной зоне в процессе затяжки резьбового соединения

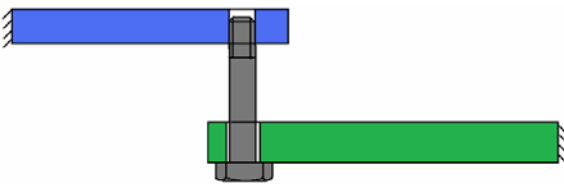


Рис. 7. Пример конструкции со значительным изменением НДС в процессе затяжки резьбового соединения

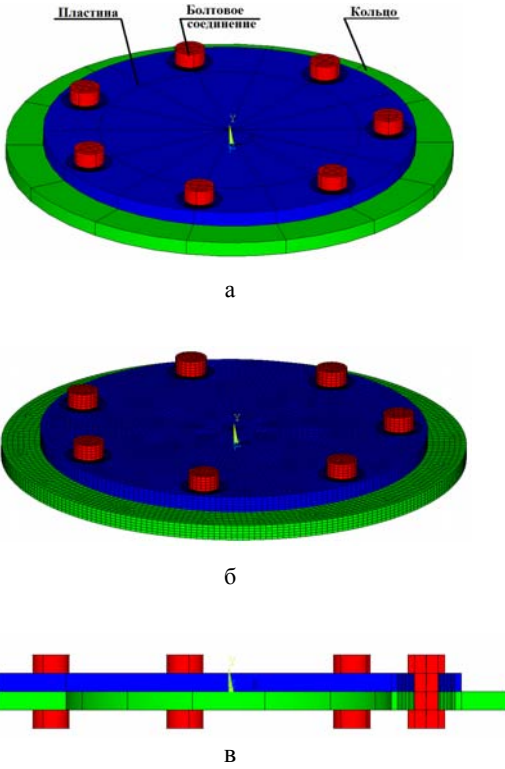
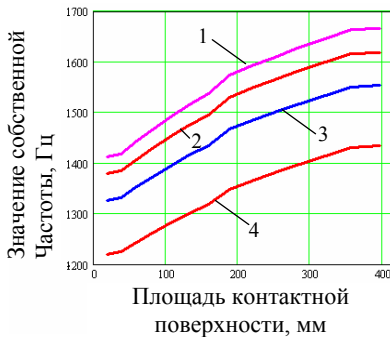


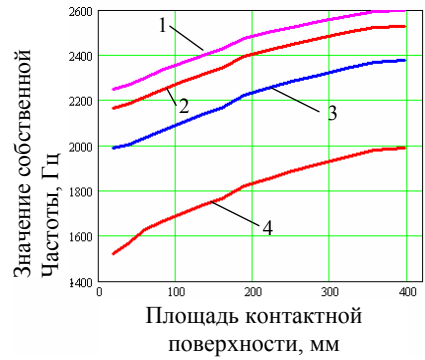
Рис. 8. Пример конструкции со значительным изменением НДС в процессе затяжки резьбового соединения:  
а – общий вид конструкции; б – конечно-элементная модель; в – общий вид конструкции в разрезе

Для исследование данной конструкции был применен подход аналогичный описанному выше.

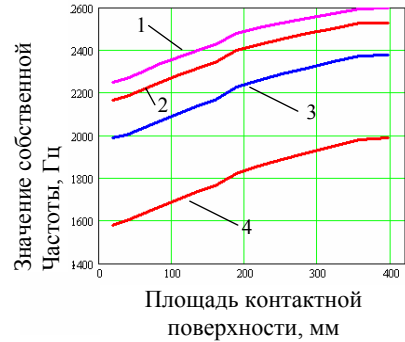
Результаты анализа приведены на рис. 9. На графиках показано изменение собственных частот при увеличении площади контактной поверхности между пластиной 1 и кольцом 2.



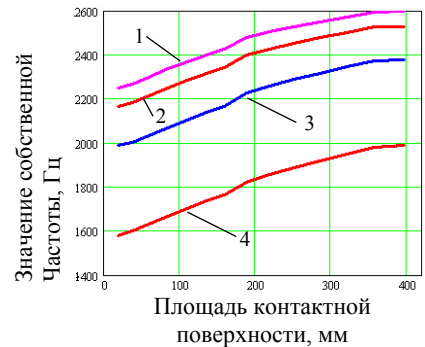
а) 1-я собственная форма колебаний



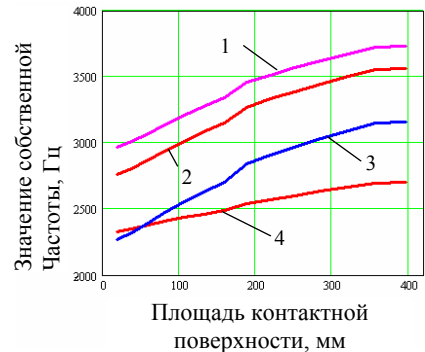
б) 2-я собственная форма колебаний



в) 3-я собственная форма колебаний



г) 4-я собственная форма колебаний



д) 5-я собственная форма колебаний

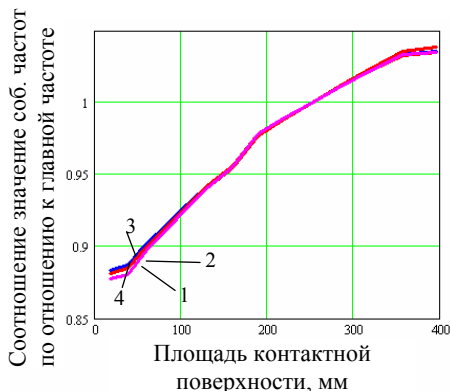
- 7 болтов (1)
- 6 болтов (2)
- 5 болтов (3)
- 4 болта (4)

д) условное отображение количества болтов на графиках

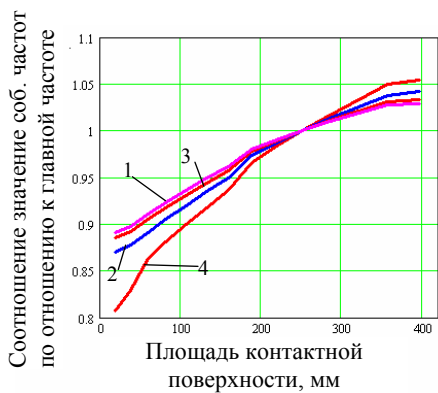
Рис. 9. Рост собственной частоты колебаний при увеличении площади контактной поверхности

Для наглядности можно построить графики соотношения собственных частот с главной частотой (рис. 10). Даже если задавать значения площади контакта не по всему фланцу, а локально в зоне резьбового соединения (без определения главной поверхности), то разброс погрешности не превысят  $\pm 15\%$ . Если назначить контакт по всему фланцу, то разница может достигать 80 %.

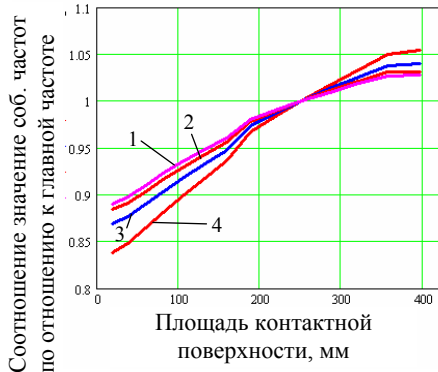
Дополнительно были проведены исследования влияния количества резьбовых элементов на собственные частоты конструкции результаты исследования приведены на рис. 11. Из графика видно, что с увеличением количества резьбовых соединений снижается их влияние на собственную частоту, что очевидно.



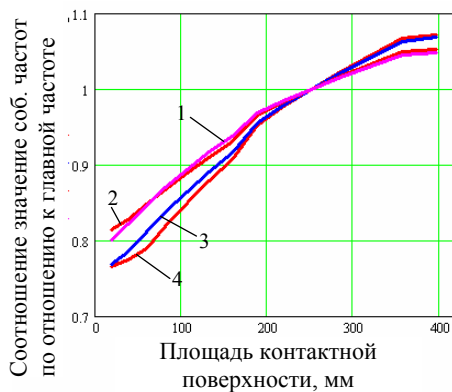
а) 1-я собственная форма колебаний



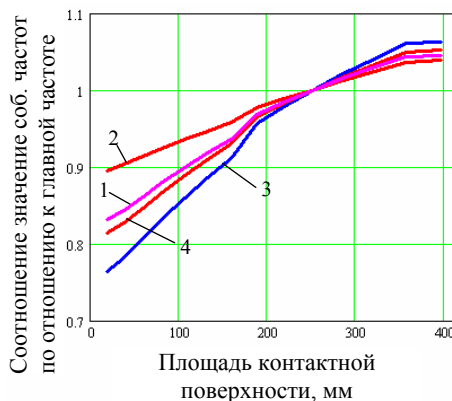
б) 2-я собственная форма колебаний



в) 3-я собственная форма колебаний



г) 4-я собственная форма колебаний



д) 5-я собственная форма колебаний

- 7 болтов (1)
- 6 болтов (2)
- 5 болтов (3)
- 4 болта (4)

д) условное отображение количества болтов на графиках

Рис. 10. Рост собственной частоты колебаний при увеличении площади контактной поверхности относительно главной частоты

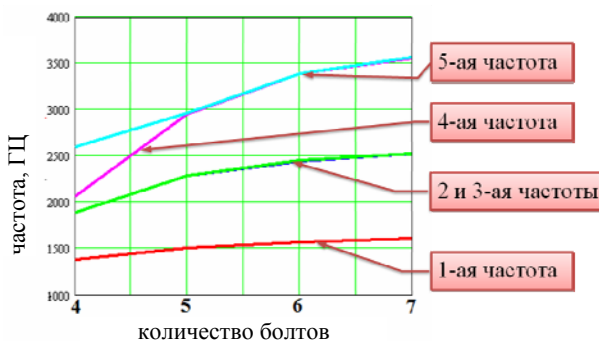


Рис. 11. Увеличение собственной частоты конструкции с увеличением числа болтов

Таким образом, в ходе исследований была подтверждена гипотеза о том, что на собственные частоты и формы существенное влияние оказывают задаваемые при создании КЭМ контактные поверхности.

Авторы рекомендуют проводить предварительный анализ резьбового соединения и расчета для него конуса давления и определения главной поверхности.

Определение для резьбового соединения главной поверхности, определяемой на основе конуса давления, позволяет повысить точность определения собственных частот до 50 %.

Для конструкций, в которых выполняется условие не раскрытия стыка и в которых затяжка не приводит к изменению жесткости конструкции в целом, моделировать предварительное НДС от затяжки нецелесообразно.

Описанный в работе подход позволит создавать более корректные КЭМ для модального анализа.

В заключение следует отметить, что необходимо продолжить дальнейшее исследование различных факторов влияющих на результаты модального анализа (НДС, влияние допусков и отклонений положения центра масс и т. д.).

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ТУННЕЛЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ БРИКЕТОВ

*А. Н. Тарабанов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время в институте используются независимые линии по изготовлению и хранению брикетов. Линии проектировались практически основателями института 40 лет назад. Рассматривая их, мы понимаем, что оборудование устарело и не отвечает современным требованиям безопасности. Одним из главных требований является заключение всего технологического процесса в замкнутый объем, исключив прямой контакт персонала с изделием. По этой причине было принято решение разработать единый комплекс, где все технологические процессы будут проходить внутри него. А объединит все линии и установки, представленный в данном докладе, транспортный туннель.

Транспортный туннель к технологическому комплексу для изготовления и хранения брикетов исключает возможность выброса опасных веществ в атмосферу при разгерметизации обжимных приспособлений, в процессе передачи изделия между независимыми линиями и установками комплекса и повысит безопасность обслуживающего персонала и экологической обстановки окружающей среды.

## 1. Общая характеристика комплекса

Технологический комплекс для изготовления брикета предназначен для сборки-разборки обжимных приспособлений и аппаратов насыщения, подготовки газовой смеси, активации брикетов ненасыщенных, насыщения брикетов, заварки трубки брикета и хранения готового изделия.

В состав технологического комплекса для изготовления брикета входят технологические установки и линии:

- подготовки газовой смеси;
- сборки – разборки;
- активации;
- насыщения;
- сварки трубки брикета;
- газоочистки.

Связующим звеном всех отдельных линий и установок в единый комплекс является транспортный туннель.

Каждая установка (линия), так же как и транспортный туннель заключены в герметичный объем с возможностью очистки среды установками газоочистки.

## 2. Цели и задачи технологического комплекса

Основной целью является разработка технологического комплекса для изготовления брикетов, предназначенного для сборки-разборки обжимных приспособлений и аппаратов насыщения, подготовки газовой смеси, активации брикетов, их насыщения, заварки трубки брикета.

Основные задачи:

- разработка современной автоматизированной системы контроля технологического процесса загрязнённости оборудования, помещений, окружающей среды, что позволит поднять технологию производства на качественно новый уровень, удовлетворяющий современным требованиям и повысить безопасность производства;
- разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом с использованием клапанов, работающих с помощью дистанционного управления, что позволит сократить количество ручного труда и обеспечит повышение безопасности производства;
- организация на базе разработанного технологического комплекса новых рабочих мест, удовлетворяющих современным требованиям науки, техники, технологии, безопасности;
- обеспечение необходимого уровня серийных технологий.

## 3. Краткое описание работы линий и установок технологического комплекса

### Подготовка газовой смеси.

Установка подготовки газовой смеси предназначена для приготовления газовой смеси заданного состава, предназначенной для изготовления брикетов.

### Линия сборки – разборки.

- Линия сборки – разборки предназначена для:
- мвзвешивания брикетов,
  - сборки брикетов в приспособления обжимные,
  - сборки приспособлений обжимных с брикетами в аппараты насыщения,
  - проверки герметичности подсоединения трубки брикета к аппарату насыщения,



- пережата и отрезки трубки брикета,
- разборки приспособлений обжимных с брикетами,

сварки пережатой трубки брикета.

#### Активация брикетов.

Установка активации предназначена для обезгаживания брикетов ненасыщенных перед насыщением.

#### Насыщение брикетов.

Установка насыщения предназначена для изготовления брикетов.

#### Транспортный туннель.

Транспортный туннель предназначен для загрузки (выгрузки) и передачи в каждую линию лопушек, аппаратов насыщения, оснастки и т.п.

Транспортный туннель соединен с каждой технологической установкой (линией) через герметичный шлюз.

Транспортный туннель оборудован дистанционно управляемой механической тележкой.

Транспортный туннель позволяет повысить безопасность персонала в момент передачи изделия

между линиями и исключить возможность загрязнения окружающей среды в аварийных ситуациях.

Рабочая среда в транспортном туннеле – сухой воздух или аргон, максимальное избыточное давление не более 200 мм вод. ст.

## 4. Состав транспортного туннеля и наиболее важные узлы

Транспортный туннель состоит из нескольких узлов, связанных в одно целое через герметичные уплотнения, выполняющих индивидуальные задачи в технологическом процессе.

Основная задача создания туннеля – объединение отдельных линий и установок в единый комплекс с применением герметичных камер, что позволит исключить возможность загрязнения окружающей среды, повысить безопасность и облегчить труд обслуживающего персонала.

Общий вид транспортного туннеля представлен на рис. 1 и рис. 2.

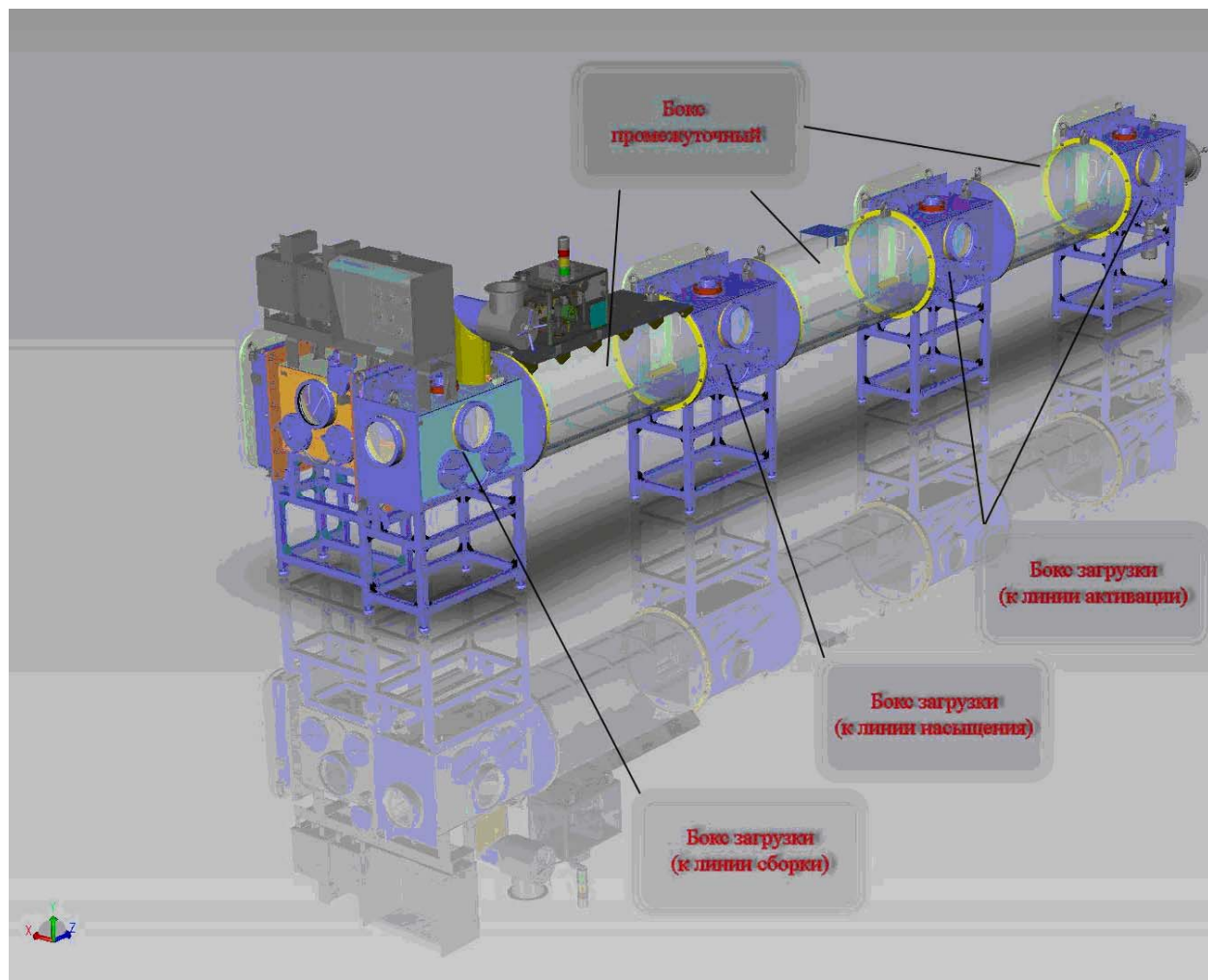


Рис. 1. Общий вид транспортного туннеля

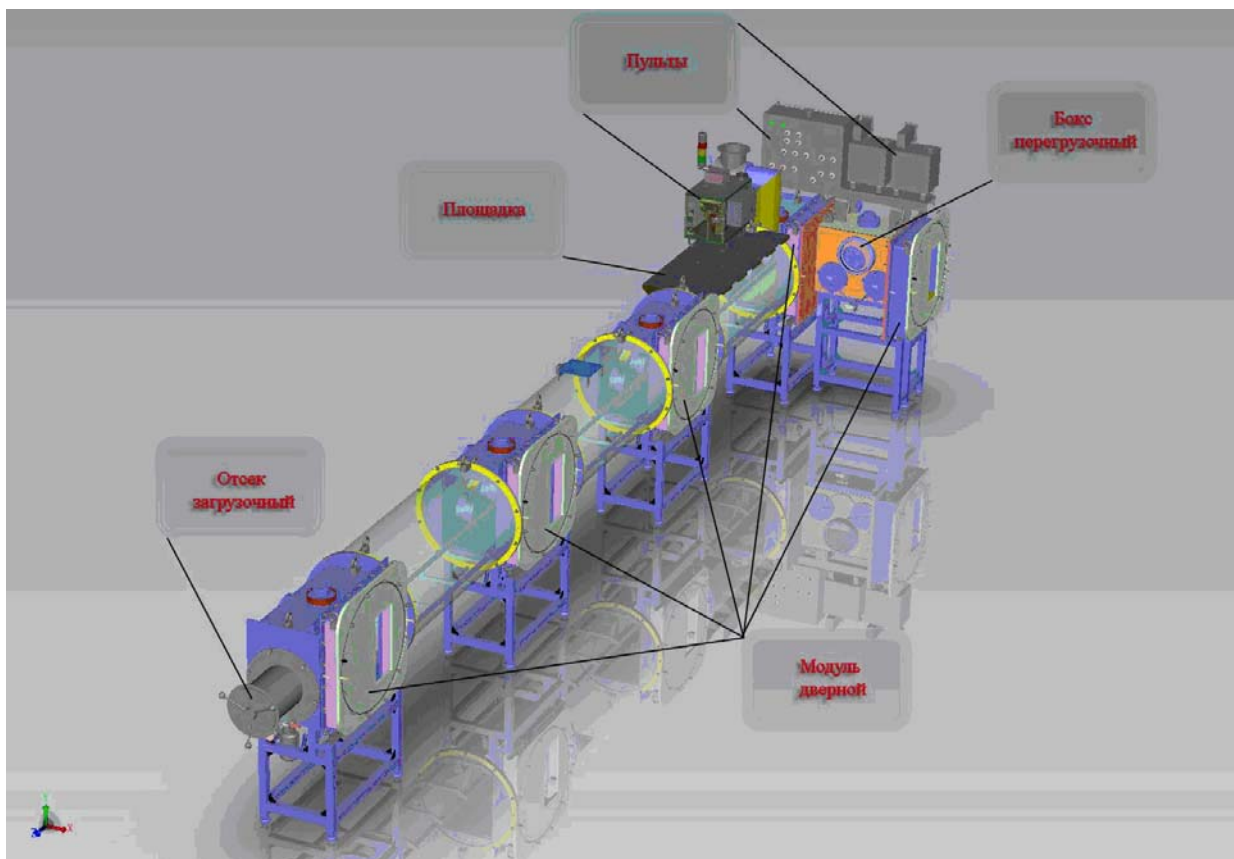


Рис. 2. Общий вид транспортного туннеля

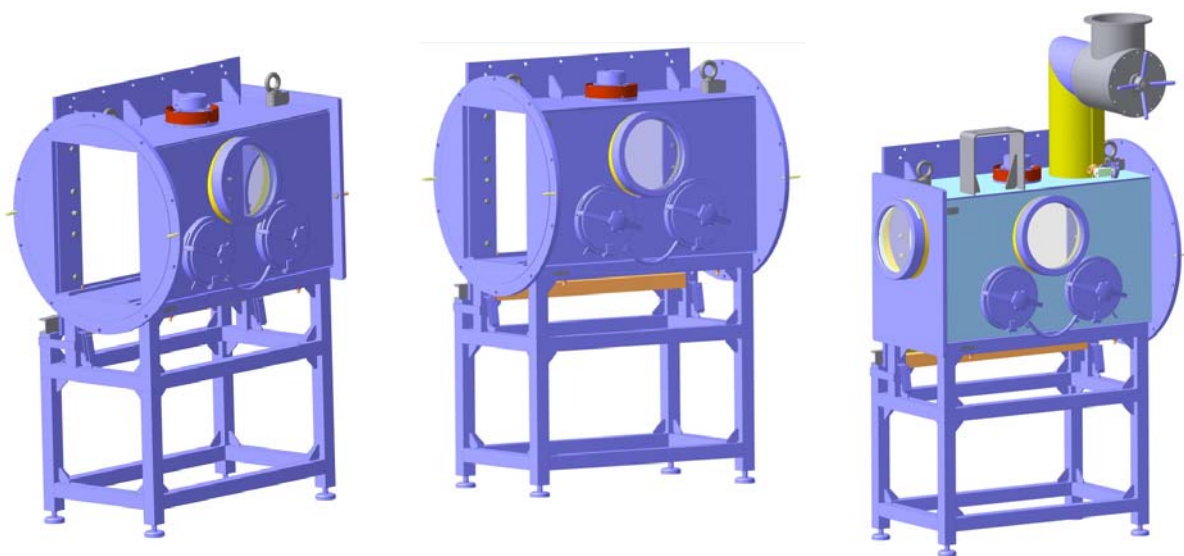


Рис. 3. Бокс загрузочный

Транспортный туннель состоит из следующих узлов:

- бокс загрузочный (рис. 3),
- бокс промежуточный (рис. 4),
- отсек загрузочный (рис. 5),
- бокс перегрузочный (рис. 6),
- модуль дверной (рис. 7),

- механизм перемещения (рис. 8),
- пульта (рис. 9),
- разводка газовая,
- площадка (рис. 10).

Боксы загрузочные разработаны для конкретных линий технологического комплекса для изготовления брикетов. Служат для передачи ловушек, аппаратов

насыщения, оснастки и т.п. в соответствующие линии. Соединены между собой промежуточными боксами. В полу бокса смонтированы рельсовые направляющие для перемещения тележки. В корпусе бокса выполнены смотровые окна и перчаточные затворы. Для освещения внутренней полости установлены светильники.

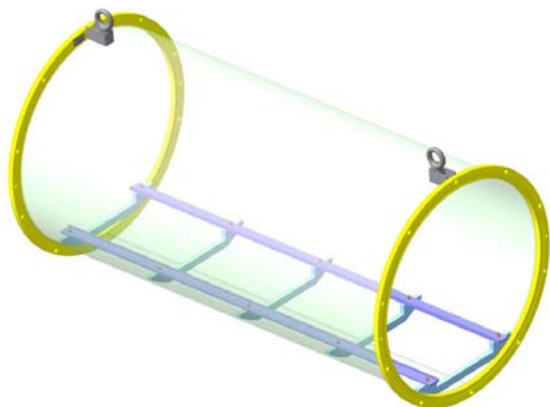


Рис. 4. Бокс промежуточный

Бокс промежуточный выполнен в форме обечайки с двумя стыковочными фланцами. По длине бокса как и в загрузочных боксах установлены рельсовые направляющие.

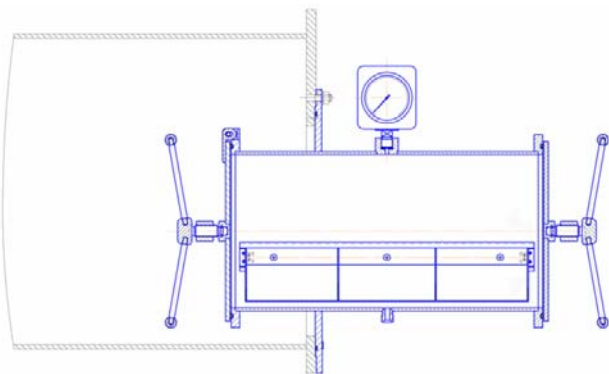


Рис. 5. Отсек загрузочный

Отсек загрузочный имеет герметичный внутренний объем. Отсек откачной. За счет своего небольшого внутреннего объема позволяет быстро создать одинаковую среду и выровнять давление между объемами отсека и туннеля, что позволяет ускорить процесс передачи ловушек, аппаратов насыщения, оснастки внутрь комплекса. Отсек снабжен выкатным поддоном.

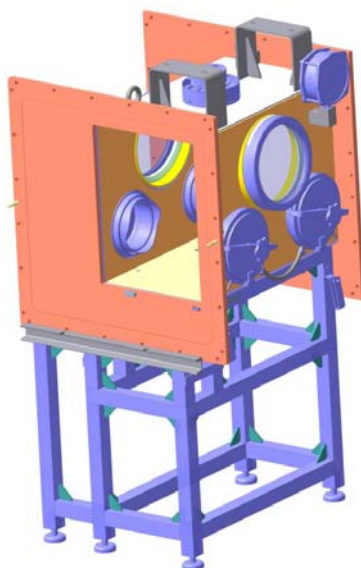


Рис. 6. Бокс перегрузочный

Перегрузочный бокс так же как и загрузочный отсек имеет самостоятельный герметичный внутренний объем и является откачным, оснащен перчаточными проемами, смотровыми окнами, светильником, служит для передачи изделий из туннеля в линию сборки технологического комплекса.

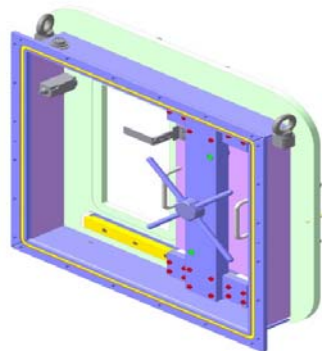


Рис. 7. Модуль дверной

Модуль дверной представляет собой корпус с фланцем, на котором размещены направляющие для перемещения шиберной двери. Дверь позволяет герметично закрывать проем за счет воздействия на нее винта. Положение герметичного закрывания контролируется концевым выключателем.

Модуль выполнен как самостоятельный узел и может использоваться в аналогичных установках с объемами имеющих разное давление и среды.

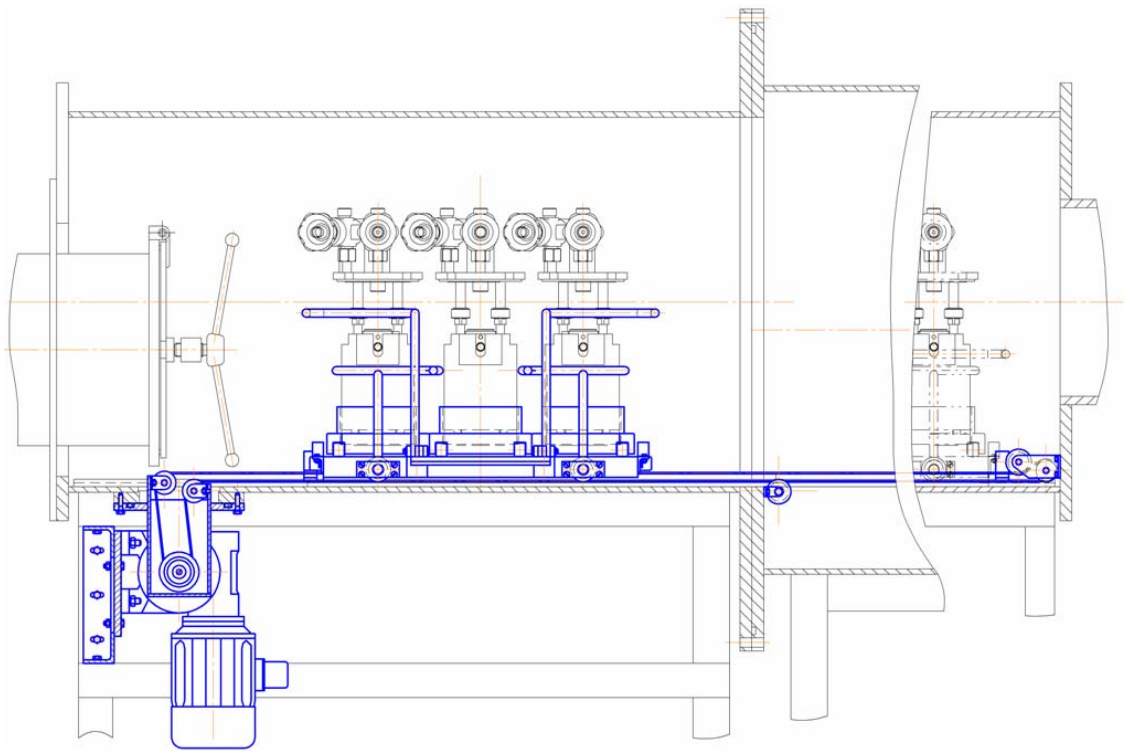


Рис. 8. Механизм перемещения

Механизм перемещения состоит из транспортной тележки, каната, натяжных роликов и мотор-редуктора. За счет реверсивного включения двигателя тележка способна перемещаться по всей длине бокса в обоих направлениях. Тележка имеет откидной трап, что позволяет перекачивать обжимные приспособления и аппараты насыщения из туннеля в линии комплекса. При помощи этого устройства сокращается трудоемкость и повышается безопасность персонала.

При проектировании пультов были использованы комплектующие как самостоятельных разрабо-

ток, так и импортных производителей. Пульты необходимы для контроля и управления рабочей среды туннеля.

Газовая разводка представляет собой систему трубопроводов, вентилей и клапанов объединяющие между собой газовую систему боксов, отсеков туннеля и линий активации, насыщения, сборки-разборки. Позволяет создавать рабочую среду в объеме туннеля, регулировать и выравнять давления между узлами туннеля и самостоятельных линий и установок.

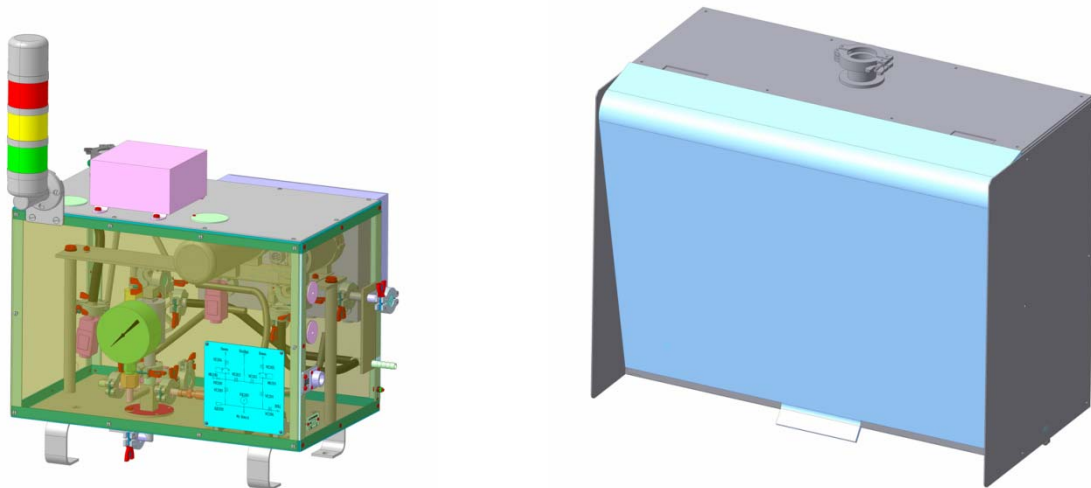


Рис. 9. Пульты



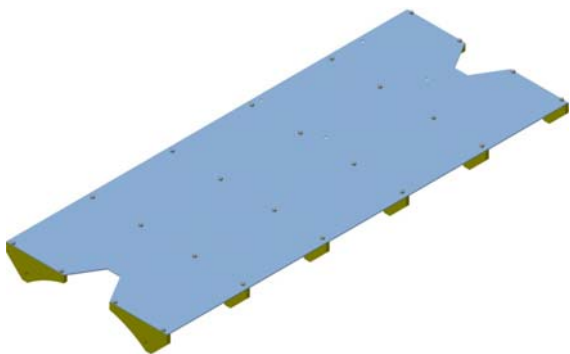


Рис. 10. Площадка

**Площадка** служит для установки дополнительного оборудования на поверхность туннеля.

### **Заключение**

При проектировании транспортного туннеля основное внимание уделялось безопасности обслужи-

вающего персонала и экологической обстановке окружающей среды.

Применение транспортного туннеля позволило сократить трудоёмкость рабочих при передаче изделия между линиями комплекса и ускорить технологический процесс при производстве брикетов.

При разработке туннеля использовались стандарты, методики и инструкции по разработке конструкторской документации, выявлялись пути и средства повышения технологичности изделия, снижения трудоёмкости изготовления и доли ручного труда при изготовлении и контроле.

Применяемые в конструкциях материалы и покрытия соответствуют требованиям по радиационной безопасности.

Предложенное изделие отвечает своему назначению и удобно в эксплуатации.

Все элементы транспортного туннеля проектировались при помощи САПР Компас-3D. Применение современной САПР позволило сократить сроки проектирования и повысить качество выпускаемой конструкторской документации.

# РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА НА ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ В ПАРОВОДЯНОЙ СРЕДЕ

В. В. Тихонов<sup>1</sup>, П. В. Шестаков<sup>2</sup>, Е. А. Денисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета

## 1. Введение

Не смотря на то, что защита от коррозии металлов исследуется уже достаточно давно, эта задача и по сегодняшний день не потеряла своей актуальности.

В России ежегодные потери металлов из-за их коррозии составляют примерно 12 % от общего металлофонда страны или 30 % от ежегодно производимого металла. В среднем в большинстве стран мира экономические потери от коррозии металлов составляют от 4 до 6 % национального дохода [1].

Обычно под коррозией понимают окисление металла в воде или водяном паре. В этом случае процесс окисления сопровождается наводороживанием металла, что приводит к эффекту замедленного гидридного растрескивания (ЗГР или ДНС (delayed hydride cracking)). Оба этих процесса наблюдаются при эксплуатации ТВЭЛов на атомных электростанциях. Для изготовления ТВЭЛов используется сплав на основе циркония, поскольку они, как и сам цирконий, обладают малым сечением поглощения тепловых нейтронов (~ 0,18 барн) и имеют высокую температуру плавления (1845 °С). В тоже время, циркониевые сплавы активно поглощают водород, образуя твердый раствор и гидриды ZrH и ZrH<sub>2</sub> [2]. Наводороживание снижает пластичность и трещиностойкость материала, а образование хрупких гидридов в местах концентрации напряжений может привести к разрушению изделия в процессе эксплуатации, что недопустимо. Во избежание аварий, а так же для увеличения срока службы ТВЭЛов в настоящее время рассматривается использование различных покрытий, защищающих их от окисления и наводороживания.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Образцы

Образцы для исследования представляли собой отрезки проволоки из циркониевого сплава Э110 (0,9–1,1 % Nb) диаметром 1,6 мм и длиной 40 мм.

Были исследованы образцы с различным состоянием поверхности:

1. не прошедшие обработку в автоклаве (серия «0»);

2. прошедшие обработку в автоклаве при температуре 400 °С и давлении водяного пара 200 атм. в течение 72 часов (серия «72»);

3. прошедшие обработку в автоклаве при температуре 400 °С и давлении водяного пара 200 атм. в течение 144 часов (серия «144», для покрытия Cr(ЭРХ)N- Cr 112 часов);

4. образцы без покрытия, прошедшие обработку в автоклаве при температуре 400 °С и давлении водяного пара 200 атм. в течение 288 часов (серия «288»).

Список исследованных образцов представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Исследованные образцы

№	Тип покрытия	До автоклавных испытаний	После 72 часов автоклавных испытаний	После 144 (*112) часов автоклавных испытаний	После 288 часов автоклавных испытаний
1	Без покрытия	+	+	+	+
2	Cr(ЭРХ) 28ц	+	+	+	-
3	Cr(ЭРХ) 30ц	+	+	+	-
4	Cr(ВХ-2К)38мин	+	+	+	-
5	Cr(ВХ-2К)48мин	+	+	+	-
6	Cr(ЭРХ)Al(max)	+	+	+	-
7	Cr(ЭРХ)Al(min)	+	+	+	-
8	Cr(ЭРХ)Al	+	-	+	-
9	Cr(ЭРХ)N	+	-	+	-
10	Cr(ЭРХ)N-Cr	+	+	*	-

### 2.2. Защитные покрытия

Все исследованные покрытия были нанесены на исследованные образцы в НПЦ ГП «Красная звезда», г. Москва.

Нанесение покрытий осуществлялось методом вакуумного дугового напыления. Принципиальная схема данного метода изображена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема нанесения покрытия методом вакуумного дугового напыления

Покрытия Cr(ЭРХ) 28ц и Cr(ЭРХ) 30ц наносились периодическим включением катода из хрома высокой очистки. Для нанесения данных покрытий было произведено соответственно 28 и 30 циклов включения-выключения катода.

Покрытия Cr(BX-2K) 38 мин и Cr(BX-2K) 48 мин наносились в ходе непрерывной работы катода из хрома низкой очистки, в течение 38 и 48 минут соответственно.

Покрытия Cr(ЭРХ)Al(max) (Cr~35%, Al~65%) и Cr(ЭРХ)Al(min) (Cr~85%, Al~15%) наносились путем попеременного включения катодов из хрома высокой очистки и алюминия. Причем контролируемое по времени осаждение адатомов происходило в разных пропорциях.

Покрытие Cr(ЭРХ)Al (Cr~50%, Al~50%) наносилось аналогично предыдущим с той лишь разницей, что соотношение адатомов Cr и Al поддерживалось равным.

Покрытие Cr(ЭРХ)N наносилось путем непрерывной работы катода из хрома высокой очистки в атмосфере азота.

Покрытие Cr(ЭРХ)N-Cr наносилось путем непрерывной работы катода из хрома высокой очистки в атмосфере азота. После этого азот откачивался, и работа катода продолжалась в вакууме.

### 2.3. Экспериментальная установка

Для исследования термодесорбции водорода из образцов была использована высоковакуумная установка, схема которой представлена на рис. 2.

Установка состоит из системы откачки, системы напуска и очистки водорода, системы регистрации.

Система откачки включает форвакуумный и два магнеторазрядных насоса. Форвакуумный насос откачивает систему до давлений порядка  $10^{-2}$  Торр. Затем два магнеторазрядных насоса НОРД-250 и НОРД-100 обеспечивают необходимый вакуум для проведения эксперимента ( $10^{-7}$  Торр).

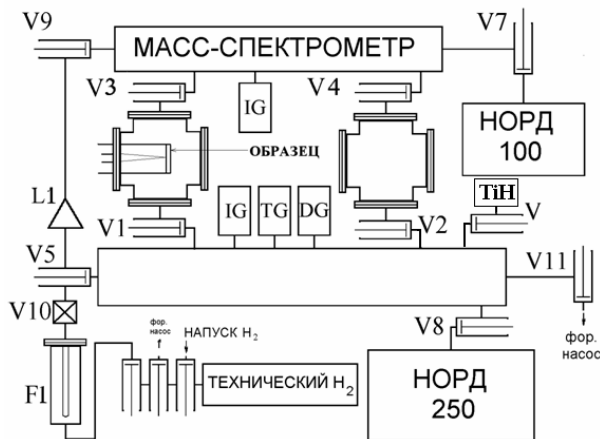


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Система регистрации включает в себя квадрупольный масс-спектрометр и три датчика давления с разными диапазонами измерений. Термопарный-TG и деформационный-DG датчики измеряют давление от атмосферного до  $10^{-4}$  Торр. Ионизационный датчик (IG) работает в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-11}$  Торр.

Фиксированная микротечь L1 служит для калибровки масс-спектрометра по известному потоку водорода.

Чувствительность системы регистрации позволяет обнаружить десорбционный поток на уровне  $10^{12}$  H<sub>2</sub>/с.

В экспериментах был использован прямонакальный программируемый нагрев образцов (электронный блок управления позволяет линейно нагревать образец с точностью поддержания температуры до 0,5 °С.). Температура измерялась W-WRe термопарой, привариваемой к середине образца точечной сваркой. Образец нагревался до 1000 °С со скоростью 0,2 °С/с, после этого удерживался при этой температуре в течение 13200 секунд. Этого времени было достаточно для того чтобы поток выделившегося водорода из образца понизился практически до нуля.

На рис. 3 изображена система крепления и нагрева образца.

Для того, чтобы уменьшить неизотермичность образца при нагреве использовалось крепление (рис. 4), обеспечивающее точечный контакт образца с тоководами. В качестве элементов крепления были выбраны отрезки циркониевой проволоки, изогнутой в виде цифры «8».



### 3. Результаты

#### 3.1. Образцы без покрытия

Полученные в ходе экспериментов с исходными непокрытыми образцами кривые термодегазации представлены на рис. 5. Из их рассмотрения можно заключить, что начало выхода водорода из образца приходится на диапазон температур 600–800 °С, а максимум термовыделения лежит в интервале температур 900–950 °С.

Поток водорода начинает спадать до того, как температура образца достигает 1000 °С (кроме 288 ч.). Максимум для серии «144» сдвинут относительно серии «72» в сторону больших температур. Это можно объяснить тем, что оксидный слой, образованный на поверхности образца в автоклаве, препятствует выделению водорода из образца. При температурах порядка 900–1000 °С этот слой начинает удаляться с поверхности и выход водорода облегчается, что особенно хорошо видно для кривой серии «288».

Для определения величины накопления водорода самим оксидом, а также для выяснения кинетики выделения водорода из чистого циркониевого сплава были проведены дополнительные исследования по термодегазации образцов без покрытия, прошедших обработку в автоклаве в течение различных периодов времени. Перед дегазацией эти образцы подвергались абразивной обработке с целью удаления поверхностного оксида. Толщина удаляемого слоя составляла величину порядка 10–20 мкм, что почти на порядок величины превосходит толщину покрытий. После удаления поверхностного слоя образцы помещались в вакуумную камеру в течение 30 минут, а затем дегазировались по стандартной схеме. Полученные в результате спектры термодегазации представлены на рис. 6.

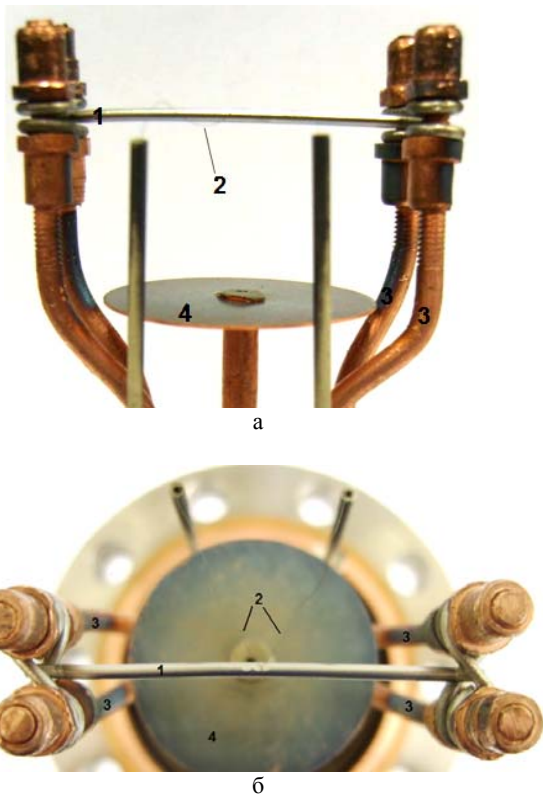


Рис. 3. Система крепления и нагрева образца. 1 – образец, 2 – термопара, 3 – токоведущие держатели, 4 – тепловой экран; а – вид сверху, б – вид спереди

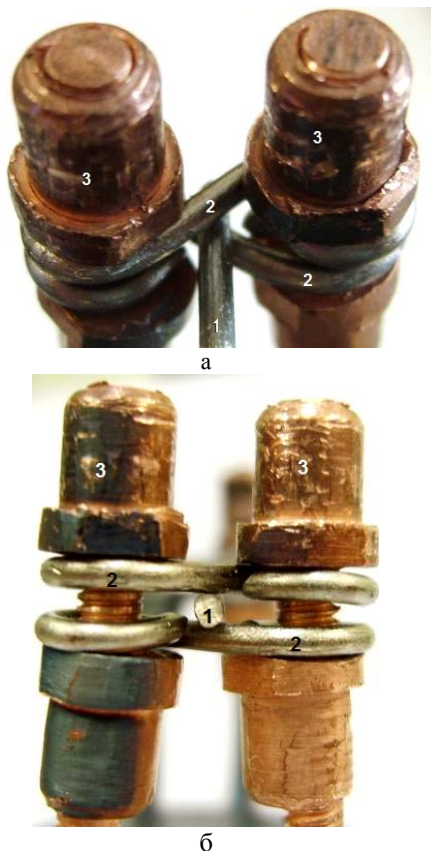


Рис. 4. Узел крепления образца между двух 8-образных циркониевых зажимов. 1 – образец, 2 – зажимы, 3 – прижимные гайки; а – общий вид, б – вид сбоку

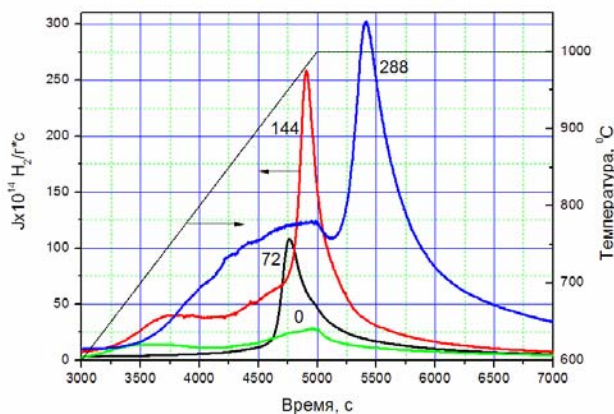


Рис. 5. Графики кривых термодегазации для образцов без покрытия после автоклавирования: – 288 часов, – 144 часа, – 72 часа, – без автоклавирования

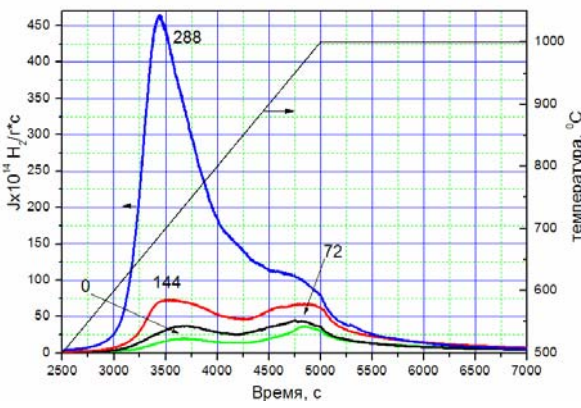


Рис. 6. Графики кривых термодезгазации для образцов без покрытия после автоклавирования (очищены от оксида перед дезгазацией): – 288 часов, – 144 часа, – 72 часа, – без автоклавирования

Из характерной формы кривых, представляющих собой два последовательных пика, можно заключить, что водород находится в образцах в двух состояниях с различной энергией связи (первый и второй пик кривых термодезгазации). Кроме того, можно видеть, что содержание водорода во втором (высокоэнергетическом состоянии) стремится к насыщению или заполняется крайне медленно, в то время как содержание водорода в первом состоянии значительно увеличивается с увеличением времени автоклавирования. Можно предположить, что первое состояние соответствует диффузионному водороду, в то время как второе состояние соответствует водороду, находящемуся в ловушках.

Необходимо отметить, что количество водорода, выделяющегося из образцов с удаленным поверхностным слоем, было не меньше, чем из образцов с сохраненным поверхностным слоем. Из этого можно заключить, что в самом оксидном слое водород в заметных количествах не накапливается.

### 3.2. Образцы с покрытиями

Кривые термодезгазации образцов с покрытиями имеют схожий вид. Для примера на рис. 7 представлен спектр термодесорбции образцов с покрытием Cr(ЭРХ)28ц. Из него можно определить, что основной пик выделения водорода лежит в диапазоне температур 950–1000 °C. Пик выделения для серии «72» лежит правее остальных пиков, в начале области постоянной температуры. Возможно, это объясняется тем, что на образцах серии «72» оксид имеет более плотную структуру, чем на образцах других серий. Таким образом, в процессе термодесорбции этот более плотный оксид замедляет выделение водорода, и пик выделения водорода приходится на момент разрушения этого плотного оксида из-за термического воздействия.

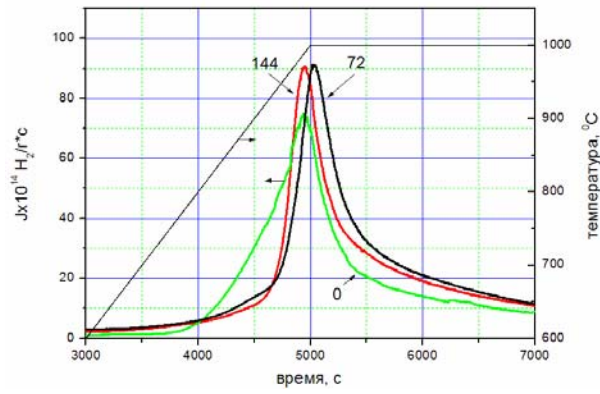


Рис. 7. Спектр термодесорбции водорода из образцов с покрытием Cr(ЭРХ)28ц, после автоклавирования: – 144 часа, – 72 часа, – без автоклавирования

### 3.3. Удельное содержание водорода в образцах с различными покрытиями

Полное содержание водорода в образце определялось как интеграл под кривой термодесорбции после вычета фона установки. Удельное содержание водорода в исследованных образцах представлено в виде гистограммы на рис. 8. Эти же данные приведены в табл. 2.

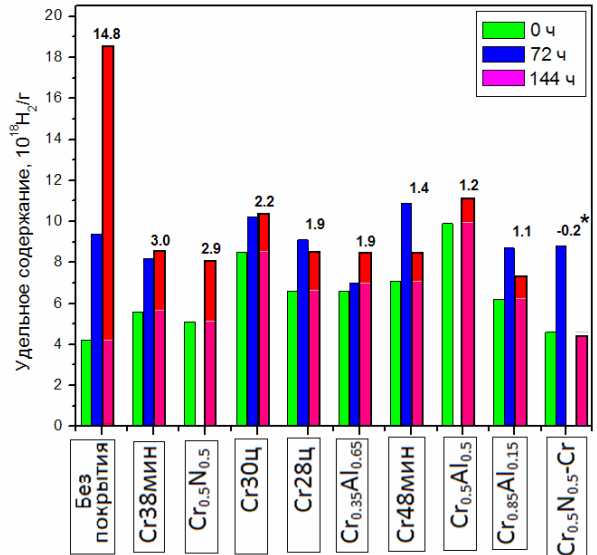


Рис. 8. Удельное содержание водорода в образцах с различными покрытиями

Таблица 2

Удельное содержание водорода в образцах с различными покрытиями до и после автоклавных испытаний ( $10^{18} \text{H}_2/\text{г}$ )

№	Тип покрытия	Количество водорода в образце до автоклавных испытаний, $Q_0$	Количество водорода в образце после 72 ч автоклавных испытаний, $Q_{72}$	Увеличение содержания водорода, $Q_{72}-Q_0$	Количество водорода в образце после 144 ч (* 112 ч) автоклавных испытаний, $Q_{144}$	Увеличение содержания водорода, $Q_{144}-Q_0$ (* $Q_{112}-Q_0$ )
1	2	3	4	5	6	7
		0 ч	72 ч		144 ч	
1	Без покрытия	4,2	9,4	5,2	19,0	14,8
2	Cr(ЭРХ) 28ц	6,6	9,1	2,5	8,5	1,9
3	Cr(ЭРХ) 30ц	8,5	10,2	1,7	10,7	2,2
4	Cr(ВХ-2К) 38мин	5,6	8,2	2,6	8,6	3,0
5	Cr(ВХ-2К) 48 мин	7,1	10,9	3,8	8,5	1,4
6	Cr(ЭРХ)Al(max)	6,6	7,0	0,4	8,5	1,9
7	Cr(ЭРХ)Al(min)	6,2	8,7	2,5	7,3	1,1
8	Cr(ЭРХ)Al	9,9	-	-	11,1	1,2
9	Cr(ЭРХ)N	5,1	-	-	8,0	2,9
10	Cr(ЭРХ)N-Cr	4,6	8,8	4,2	4,4*	-0,2*

Из приведенных данных можно сделать обобщение, что процесс нанесения всех покрытий, за исключением Cr(ВХ-2К) 38 мин, Cr(ЭРХ)N и Cr(ЭРХ)N-Cr приводит к увеличению начального содержания водорода в исходных образцах в 1,5–2 раза. В тоже время покрытия Cr(ВХ-2К) 38 мин и Cr(ЭРХ)N показали наибольшее накопление водорода в процессе автоклавирования. Так же следует отметить, что высокое удельное содержание водорода в образцах серии «72» (по сравнению с серией «144») с покрытиями Cr(ЭРХ) 28ц, Cr(ВХ-2К) 48мин, Cr(ЭРХ)Al(min) и Cr(ЭРХ)N-Cr связано, вероятно, с тем, что их испытания, в отличие от других серий, проводились в другом автоклаве. Возможно, что состав воды, температура или другие параметры этого автоклава могли отличаться от параметров первого автоклава, что могло повлиять на скорость окисления образцов, и, соответственно, на количество содержащегося в них водорода. По результатам для серии «144» наименьшее накопление показали покрытия Cr(ЭРХ)Al(min), Cr(ЭРХ)Al и Cr(ЭРХ)N-Cr. В то же время образцы с покрытием Cr(ЭРХ)Al имеют наибольшее начальное содержание водорода, что говорит о необходимости совершенствования технологии нанесения данных покрытий.

Интересно, что покрытия Cr(ЭРХ)Al(min) и Cr(ЭРХ)Al показали сходные защитные свойства, в то время как аналогичное покрытие Cr(ЭРХ)Al(max), отличающееся лишь процентным содержанием элементов, показало в два раза большее накопление водорода. Согласно [3], антикоррозионные свойства композитных покрытий из хрома и алюминия являются следствием образования плотных защитных оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые замедляют процесс окисления. В тоже время содержание в композитном покрытии хрома более 30 % увеличивает сопротивляемость оксида алюминия к отслаиванию, поскольку сам по себе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обладает плохой адгезией. Таким образом, недостаток хрома в композитном покрытии с алюминием может понизить коррозионную стойкость покрытия.

#### 4. Выводы

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

1. Нанесение всех исследованных защитных покрытий приводит к уменьшению содержания водорода в образцах из сплава Э110 в 5–14 раз после автоклавных испытаний.

2. Защитные свойства покрытий являются следствием образования защитных оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые замедляют процесс окисления металла.

3. Наилучшие защитные характеристики показали композитные покрытия на основе хрома и алюминия в пропорциях Cr ~ 85 %, Al ~ 15 % и Cr ~ 50 %, Al ~ 50 %.

Для определения применимости этих покрытий для защиты ТВЭЛов от наводораживания требуется проведение экспериментов на образцах со временем автоклавных испытаний, сопоставимых со временем эксплуатации ТВЭЛов, и в условиях близких к реальным, где кроме коррозионного водорода может присутствовать водород, образовавшийся в результате радиолитического распада воды под действием нейтронов и гамма излучения, а так же водород, выделяющийся из топлива при эксплуатации.

#### Литература

- Семенова И. В., Флоринович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002.
- Никулин С. А., Рожнов А. Б., Бабукин А. В. и др. Структура и сопротивление разрушению циркониевых сплавов для атомной энергетики // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005, № 5. С. 8–17.
- Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок. В 2-х книгах. Кн. 2. М.: Металлургия, 1995. С.

# ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЭМС УСТРОЙСТВ

К. Г. Чуркин

ФГУП ФНИЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко», г. Заречный Пензенской обл.

Рынок МЭМС устройств один из наиболее быстро развивающихся. К 2012 году объем продаж на рынке МЭМС составит 9,7 млрд \$, а объем производства 4,3 млрд. шт. Доля России на мировом рынке МЭМС менее 1%. В связи с этим руководством предприятия ФГУП ФНИЦ «ПО «Старт»» было принято решение об освоении производства МЭМС.

В процессе выполнения поставленной задачи мы столкнулись с следующими трудностями:

- дорогостоящее программное обеспечение;
- отсутствие нормативно-технической документации;
- недостаточное количество информации о свойствах используемых материалов;
- отсутствие взаимосвязи между разработчиками, исследовательскими институтами и собственно производством.

Рассмотрим все эти проблемы более подробно.

**Для разработки МЭМС устройств используются следующие программные пакеты:**

Ansys – многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широком круге инженерных дисциплин (прочность, теплофизика, динамика жидкостей и газов и электромагнетизм).

CoventorWare – обеспечивающий разработчикам два встречных пути проектирования: снизу вверх и сверху вниз.

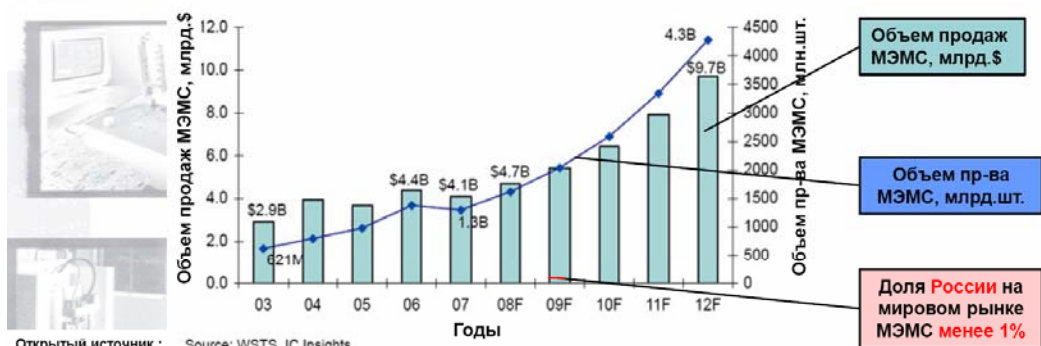
ANSYS является универсальным «тяжелым» конечно-элементным пакетом, предназначенным для решения в единой среде (и на одной и той же конечно-элементной модели) задач:

- прочности,
- тепла,
- электромагнетизма,
- гидрогазодинамики,
- многодисциплинарного связанного анализа, объединяющего все четыре типа,
- оптимизации на основе всех вышеприведенных типов анализа.

Аналитические возможности ANSYS:

- линейная прочность,
- нелинейности,
- динамический анализ (частотная область),
- механика разрушения,
- тепловой анализ,
- гидрогазодинамика,
- модели вязкости,
- электромагнитный анализ,
- совместный анализ,
- усталостный анализ,
- специальные возможности.

CoventorWare – пакет, обеспечивающий разработчикам два встречных пути проектирования: снизу вверх и сверху вниз. При проектировании сверху



В настоящее время рынок МЭМС интенсивно развивается.

По прогнозам в период до 2012 г.:

**Объем продаж МЭМС** вырастет на **19 %** и составит **9,7 млрд. \$**

**Ежегодный объем пр-ва МЭМС** вырастет на **27 %** и составит **4,3 млрд.шт.**

Рис. 1. Прогноз роста рынка МЭМС устройств

вниз сначала строится общая концепция создаваемого устройства и прорисовывается его схема на основе поведенческих моделей подсистем. Затем производится уточнение решения для реализации используемых подсистем, выполняется их оптимизация, после чего по их итогам проводится итерационный цикл уточнения параметров всей системы. Далее производится полное электромагнитное и электро-механическое моделирование разработанной системы, и проект передается на производство для технологической проработки. Среднее время проектирования в этом случае составляет около одной недели. Путь проектирования снизу вверх является более общим и полным, поэтому позволяет реализовать функции, не имеющие описания в библиотеках поведенческих моделей. Сначала здесь задается спецификация устройства самого низшего уровня, производится прорисовка его топологии, электромагнитное и механическое моделирование. Итерационный цикл оптимизации таких устройств может длиться от нескольких часов до нескольких дней. Далее оптимизированные устройства группируются в более сложные интегрированные системы, которые также анализируются и оптимизируются, после чего передаются на производство. При таком подходе цикл проектирования занимает около трех месяцев.

**В качестве вспомогательных, используются следующие программные пакеты:**

T—FLEXCAD используется в основном для создания трехмерных моделей МЭМС устройств. Данная САПР отличается простотой создания моделей, возможностью экспортирования готовых моделей в форматах поддерживаемых большинством САПР и возможностью быстрого создания конструкторской документации.

Система автоматизированного проектирования TannerPro предназначена для проектирования интегральных схем и компонентов микросистемной техники. В основном используется для конструирования и моделирования схем обработки информации, получаемой от чувствительных элементов МЭМС датчиков.

**Отсутствие нормативной документации.**

Немаловажной проблемой конструирования МЭМС относится отсутствие в нашей стране даже базовой нормативной документации (ГОСТов, ОСТов) для МЭМС.

Использование международных стандартов затруднительно и не всегда возможно.

Так, например, их использование не является возможным для изделий, областью применения которых является оборонная промышленность.

**Недостаточное количество информации о механических свойствах используемых материалов.**

Электрические свойства многих материалов представлены в широком объеме, что обусловлено их длительным использованием в полупроводниковых технологиях. Для решения этой проблемы необходимо проведение исследований тех свойств материалов, которые еще мало изучены, но представляют

интерес в связи с возможным использованием данных материалов для создания МЭМС.

**Отсутствие взаимосвязи между разработчиками, производителями и исследовательскими институтами.**

В качестве возможного решения этой проблемы предприятия ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» и ОАО «Совтест АТЕ» предложили создание ассоциации «МЭМС-Россия».

Данное решение было принято в 2009 году на конференции «Технологии производства перспективных МЭМС приборов».

Дальнейшее его обсуждение было продолжено весной 2010 года на конференции «Современные тенденции и технологии производства МЭМС устройств».

Конференция «Технологии производства перспективных МЭМС приборов»

В период с 13 по 14 октября 2009 г. на базе предприятия ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» г. Заречный прошла конференция, посвященная разработке и выпуску устройств с использованием микроэлектромеханических систем. Конференция показала большую заинтересованность российских производственных предприятий и научных организаций в развитии МЭМС технологий. В конференции приняли участие более 25 научных организаций и производителей, занимающихся созданием МЭМС.

Конференция «Современные тенденции и технологии производства МЭМС устройств»

В период с 17 по 18 марта 2010 г., под эгидой предприятий «Совтест АТЕ» и ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» прошла международная конференция посвященная вопросам технологии и особенностям изготовления различных МЭМС изделий (датчики, акселерометры, микропомпы, сенсоры и др.). Конференция была организована в рамках научно инновационной кооперации существующей между предприятиями и продолжала развивать тематику МЭМС затронутую на конференции, прошедшей в октябре 2009 г. на ПО «Старт».

«МЭМС-Россия» – Международная Ассоциация разработчиков и производителей МЭМС.

В июне 2010 года эта ассоциация была официально зарегистрирована и начала свою работу.

Целями Ассоциации являются:

– представление и защита интересов производителей микроэлектромеханических систем, а именно содействие увеличению их доли на российском рынке;

– обеспечение контакта зарубежных партнеров с российскими производителями МЭМС, для увеличения доли экспорта российской электроники на зарубежные перспективные рынки;

– взаимодействие иностранных производителей МЭМС с российскими коллегами, с целью передачи и внедрения современных технологий производства МЭМС, на отечественных предприятиях;



– обеспечение эффективного информационного обмена между Членами Ассоциации.

Руководство ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» считает направление МЭМС одним из самых перспективных и активно его развивает.

По данному направлению уже ведутся совместные работы с несколькими предприятиями и институтами.

Мы готовы рассмотреть и другие предложения по развитию МЭМС технологий.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})_{1,1}\text{CrMn}$ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

И. С. Шахурина<sup>1</sup>, А. Н. Голубков<sup>1</sup>, С. В. Фильчагин<sup>1</sup>, А. А. Юхимчук<sup>1</sup>, S. Kumar<sup>2</sup>, B. Siskind<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>Фирма Джeneral Моторз, Уоррен, США

<sup>3</sup>Брукхевинская национальная лаборатория, Уптон, США

## Введение

Использование альтернативных видов топлива, в частности, водорода, является одним из основных направлений развития автомобильной промышленности.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана конструкция металлгидридного водородного бака для автотранспортных средств [1]. Для проверки работоспособности конструкции бака в нем, в качестве гидридообразующего материала, использовалось ИМС  $(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})_{1,1}\text{CrMn}$  [2]. Известно, что взаимодействие водорода с ИМС может сопровождаться изменениями его свойств, например, реакцией гидрогенолиза [3], в результате которой возможно разложение исходного интерметаллида с образованием устойчивого бинарного гидрида и нового интерметаллида, обогащенного неактивным по отношению к водороду металлом, или непосредственно этого металла [4]. Такие изменения чаще всего проявляются в условиях меняющегося давления и температуры, т. е. в циклах сорбции и десорбции газа из ИМС. Помимо гидрогенолиза могут происходить и другие процессы, меняющие рабочие характеристики сорбента. Целью данной работы являлось исследование обратимой сорбционной емкости  $(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})_{1,1}\text{CrMn}$  в процессе термоциклирования.

## Экспериментальная часть

Работа по исследованию характеристик ИМС в процессе циклирования проводилась на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Образец ИМС массой 19 г помещался в ампулу (5). Активация образца проводилась при 500 °С в течение 2 часов при давлении ~ 0,1 мбар. Измерение температуры производилось с помощью термопары (1), введенной непосредственно в исследуемый гидрид. После активации ампула охлаждалась до комнатной температуры, а затем проводилось насыщение образца.

Методика измерений при термоциклировании заключалась в выделении газа при нагреве гидрида в калиброванный объем (3) и обратном его поглощении при охлаждении. Предполагалось, что изменение емкости ИМС пропорционально изменению разности давлений газа в процессе нагрева и охлаждения исследуемого вещества. Поэтому в процессе непрерывного термоциклирования образца с помощью датчика тензометрического типа (6) производилась регистрация давления в калиброванном объеме (3).

Нагрев гидрида производился до температуры 363 К, а охлаждение – до температуры 303 К. Время нагрева образца составляло 9 мин., время охлаждения – 51 мин, таким образом, время одного цикла составило 1 час. При таких температурных парамет-

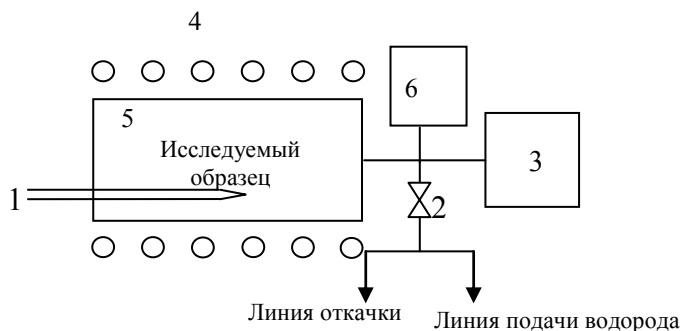


Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения термоциклирования:  
1 – термопара, 2 – вентиль, 3 – калиброванный объем, 4 – электронагреватель,  
5 – стальная ампула, 6 – датчик давления



рах давление газа в объеме (3) менялось в пределах 150–350 бар. Было необходимо исследовать изменение свойств ИМС на базе 1000 циклов, однако из-за неустраняемого нарушения герметичности запорной арматуры обработка данных была проведена только для 860 циклов.

Термоциклирование ИМС проводилось с использованием автоматизированной системы управления установкой и сбора данных.

### Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) подсистемы управления давлением разработано на базе пакета CRW32 [5], предназначенного для автоматизации физических измерений, технологических процессов и экспериментальных установок [6]. Разработанная программа выполняет:

- работу с модулями аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000;
- преобразование электрических сигналов датчиков в давление и температуру в соответствии с калибровками;
- отображение измеряемых значений давления и температуры в текстовой и графической форме в реальном времени;

- управление подсистемой посредством графического интерфейса;
- сохранение протокола работы подсистемы на жестком диске компьютера.

### Результаты и их обсуждение

Перед термоциклированием ИМС было проведено предварительное исследование изменения обратимой сорбционной емкости гидрида ИМС  $(Ti_{0,9}Zr_{0,1})_{1,1}CrMn$  в нескольких циклах сорбция-десорбция. На рис. 2 приведены зависимости давления газа от его концентрации при температуре 24,5 °С для первых трех циклов сорбция-десорбция.

Из рис. 2 видно, что давления и сорбционная емкость гидрида стабилизируются уже после одного цикла сорбция-десорбция.

На рис. 3 показан характер изменения давления в емкости (3) в процессе нагрева и охлаждения образца.

Как уже говорилось, нами предполагалось, что разность давлений при нагреве и охлаждении образца пропорциональна его обратимой сорбционной емкости по водороду.

Полученная зависимость относительного изменения разности давлений в объеме (3) от числа цик-

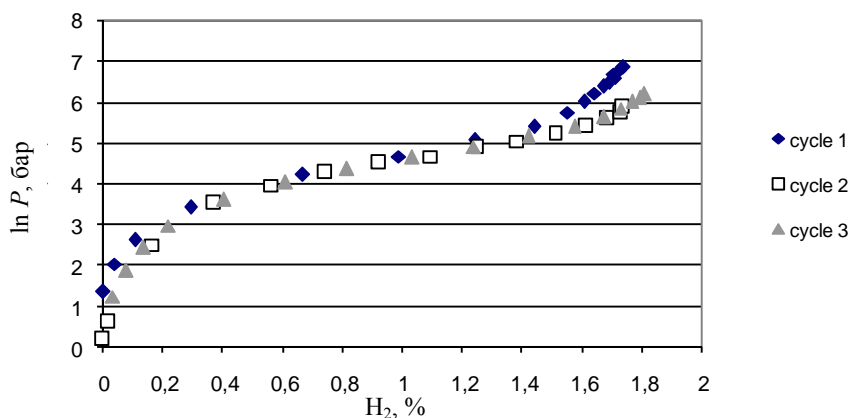


Рис. 2. Соотношения давление – количество поглощенного газа для первых 3 циклов насыщения гидрида ИМС  $(Ti_{0,9}Zr_{0,1})_{1,1}CrMn$

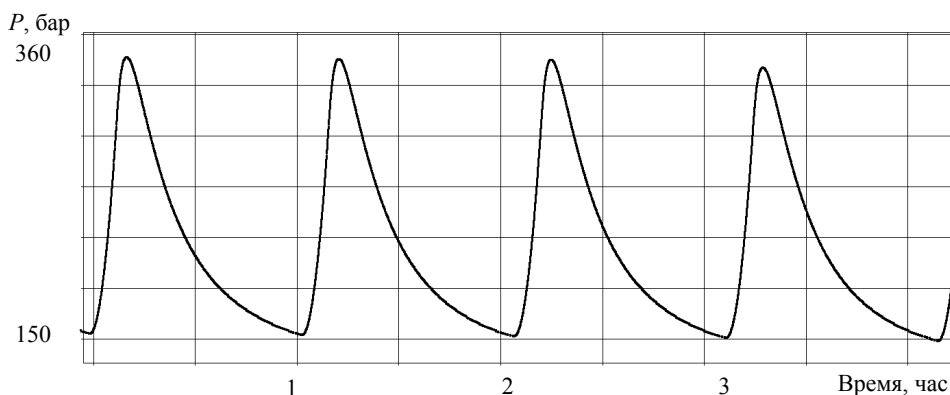


Рис. 3. Зависимость изменения давления от времени термоциклирования

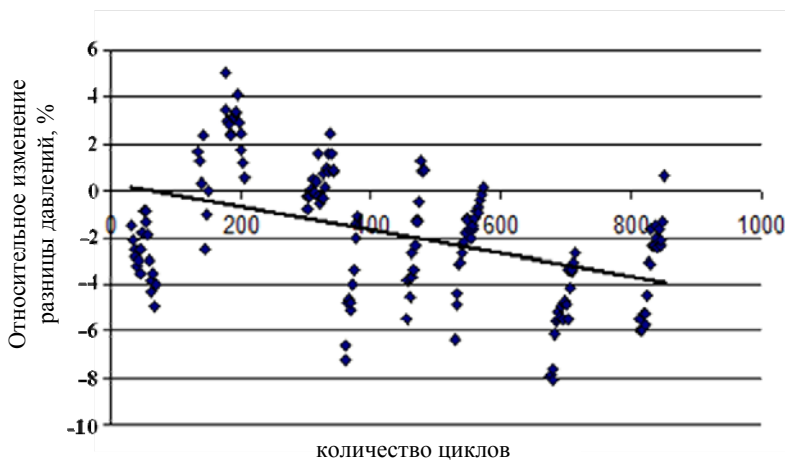


Рис. 4. Зависимость относительного изменения разности давлений от количества циклов

лов представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что в процессе термоциклирования наблюдается незначительное снижение разности давлений в калиброванном объеме (3). Это показывает, что происходит снижение емкости гидрида ИМС. Было найдено, что изменение обратимой сорбционной емкости от числа циклов можно аппроксимировать уравнением

$$y = -0,0051x,$$

где  $y$  – относительное изменение обратимой сорбционной емкости сорбента,  $x$  – число циклов. Таким образом за 1000 циклов снижение емкости составит ~5 %.

### Выводы

Найдено, что емкость и равновесные давления для гидрида ИМС ( $Ti_{0,9}Zr_{0,1}$ )<sub>1,1</sub>CrMn стабилизируются после одного цикла сорбция-десорбция.

В процессе термоциклирования, происходившего в температурном интервале 303–363 К, отмечено незначительное снижение обратимой сорбционной емкости ИМС. Оценено, что за 1000 циклов обратимая сорбционная емкость ИМС снизится на ~5 %.

### Литература

1. Патент РФ № 75708. Устройство для хранения и подачи газообразного топлива / А. А. Юхимчук,

В. В. Попов, В. В. Балувев, С. К. Гришечкин, S. Jorgensen. Опубликовано 20.08.2008. Бюл. № 23.

2. Юхимчук А. А., Балувев В. В., Попов В. В., Гришечкин С. К., Kumar S., Siskind V. Разработка металлгидридного бака для автотранспортных средств // Сборник трудов IV Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, IHISM'09» (в печати).

3. Семененко К. Н., Вербецкий В. Н., Иоффе М. И. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия», 1979. Т. 20, № 6. С. 560–563.

4. Семененко К. Н., Бурнашева В. В. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия», 1977. Т. 18, № 5. С. 618–632.

5. Виноградов Ю. И., Курякин А. В. / Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW32-DAQ) // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г.

6. Виноградов Ю. И., Курякин А. В. Программное обеспечение для автоматизации исследовательских установок // Сборник докладов второго международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, IHISM'04», г. Саров, 12–17 апреля 2004 г. / Саров: ВНИИЭФ, 2005. С. 411–419.

# АНИЗОТРОПНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА НА ГЛУБИНУ БОЛЕЕ 250 МКМ

*А. А. Шильников, Н. Н. Аладышева*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Современный рынок предъявляет весьма высокие требования к качеству и техническим возможностям кварцевых пьезоэлектрических резонаторов и преобразователей, предназначенных для средств управления и навигации.

Производство прецизионных преобразователей ускорения предусматривает разработку и производство кварцевых резонаторов-сенсоров, частота которых изменяется при воздействии на них. Эти приборы должны иметь высокую точность сохраняющиеся даже при различных климатических условиях [1].

Разработкой и производством кварцевых резонаторов наряду с РФЯЦ-ВНИИЭФ занимаются такие предприятия России, как ОАО «Морион» г. С.-Петербург, ГП «Пьезо» г. Москва, ООО «СКТБ Элпа» г. Углич и другие.

Одной из основных задач, решением которой занимаются предприятия-изготовители элементов кварцевых резонаторов, является разработка технологии их изготовления, обеспечивающей высокую точность воспроизведения геометрических размеров датчиков, что в большой степени определяет их электрофизические характеристики. При разработке новых техпроцессов изготовления деталей из пьезокварца очень важно обеспечить прецизионность их травления после электронолитографии или фотолитографии с максимальной скоростью в направлении, перпендикулярном поверхности, и с минимальной скоростью в боковом направлении, что особенно актуально при больших глубинах травления. Такое анизотропное глубинное травление некоторых материалов, таких как монокристаллический кварц, лангасит, лангит является задачей практически не разрешимой для процессов традиционного химического травления. Практический опыт показывает, что жидкостное травление кварца на глубины более 50 мкм происходит недостаточно анизотропно, о чем свидетельствует боковой подтрав (скошенный профиль) (рис. 1), а это является одной из серьезных проблем при изготовлении кварцевого чувствительного элемента.

Для решения проблемы формирования микроструктур с разрешением по линейным размерам в субмикронной области наиболее перспективны ионно-плазменные процессы.

В настоящее время, по-прежнему, лидерство удерживают высокоэффективные системы обработки, использующие плазму. Плазма генерируется в скрещенных электрическом и магнитном полях, при использовании резонансных явлений в ВЧ и СВЧ плазме.

Обеспечивая генерацию плазмы высокой плотности (более  $10^{12}$  электронов в  $\text{см}^3$  в среде аргона) и высокие скорости обработки, в то же время эти системы создают низкий уровень теплового и зарядового воздействия на обрабатываемые структуры, а также обеспечивают высокую чистоту процесса, поскольку работают при сравнительно низких давлениях и сводят к минимуму возможность распыления элементов внутрикамерного устройства.

В работе проведено исследование возможности сквозного плазмохимического травления монокристаллического кварца для создания требуемых конфигураций чувствительного кварцевого элемента (ЧЭ) из пластин монокристаллического кварца толщиной 350 мкм и с отклонением стенок пазов от нормали к поверхности пластины не более  $10^\circ$ , с минимальной шириной пазов 80 мкм.

## Характеристика плазмохимического травления

Основу процессов плазмохимического травления (далее ПХТ) составляют химические реакции энергетических частиц плазмы с материалом на его поверхности. Иницирование таких реакций возможно только при наличии высокой химической активности частиц плазмы.

Процессы ПХТ могут проходить при одновременной ионной бомбардировке. На кинетику химического взаимодействия накладывается кинетика физического распыления и активация обрабатываемой поверхности. Скорость ПХТ с ионной бомбардировкой может быть представлена как сумма скоростей травления, определяемого химическим процессом и физическим распылением. Следует отметить, что процессы физического распыления материала и удаления материала вследствие химических реакций в процессах ПХТ складываются не аддитивно, т. е. суммарная скорость травления материала в результате двух процессов намного больше суммы скоростей травления материалов в каждом процессе.

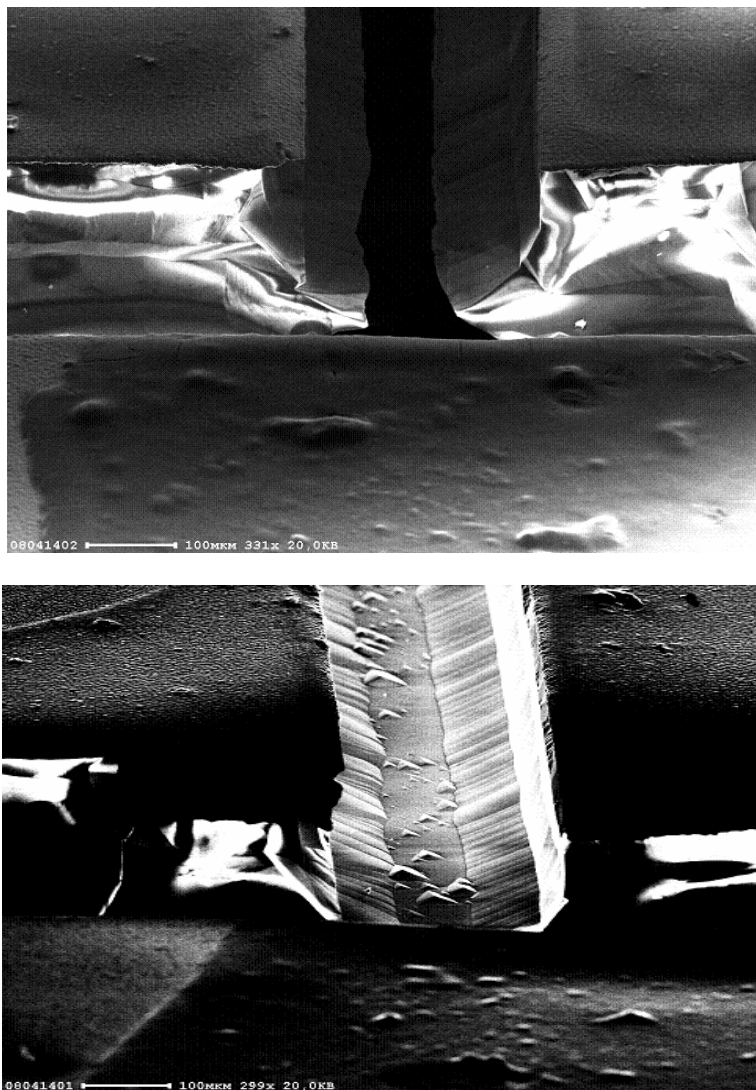


Рис. 1. РЭМ фотографии канавок, полученных химическим травлением

В области обрабатываемых подложек поддерживается относительно высокий вакуум:  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  Па, ионы движутся строго направленно, и обеспечивается направленное воздействие на материалы.

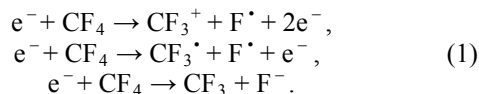
Более 90 % частиц плазмы, участвующих в процессе ПХТ – свободные радикалы. Они представляют собой главный источник реактивности плазмы. Необходимо, чтобы энергетические частицы реактивной плазмы образовывали с обрабатываемыми материалами летучие соединения при достаточно низких температурах. Их испарение с поверхности и последующая откачка обеспечивают необходимое удаление обрабатываемого материала. Формирование нелетучего соединения останавливает или значительно затормаживает процесс ПХТ [2].

Успешное проведение процесса ПХТ в основном определяется правильным выбором рабочего вещества: газа или смеси газов. В качестве рабочих веществ используются, главным образом, галогенсодержащие газы, легколетучие жидкости, кислород и водород. Для травления кремния и кремнийсодер-

жащих соединений (кварца), металлов и других материалов используются различные виды хладонов,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{XeF}_2$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{NF}_3$  и их смеси с кислородом, азотом, инертными газами.

Рассмотрим процесс формирования реактивных частиц плазмы на примере типичного для процессов ИХТ и ПХТ рабочего вещества хладон-14  $\text{CF}_4$ .

В результате взаимодействия электронов с молекулами  $\text{CF}_4$  в разряде происходит диссоциация и ионизация молекул. Это приводит к образованию химически активных частиц плазмы. Предполагаемые реакции протекают по схеме [3]:



Последняя реакция будет иметь продолжение:  $e^- + \text{F}^- \rightarrow \text{F}^* + 2e^-$ .

Таким образом, в соответствии с данными реакциями в разряде происходит образование свободных

радикалов фтора  $F^{\cdot}$  и фторуглерода  $CF_3^{\cdot}$ . Эти частицы являются основными реактивными частицами образующейся плазмы  $CF_4$ .

Реакции ПХТ кремния и кремнийсодержащих соединений  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$  в общем виде могут быть записаны:

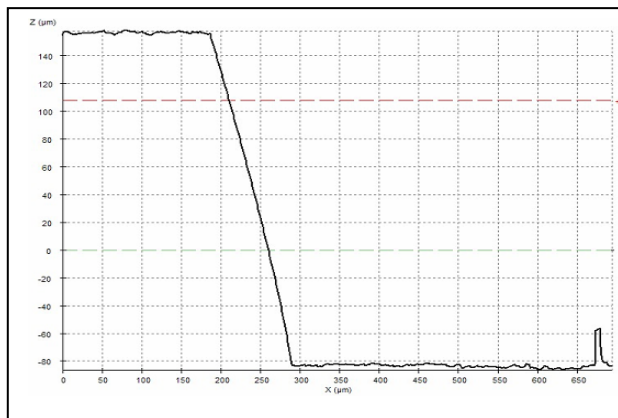
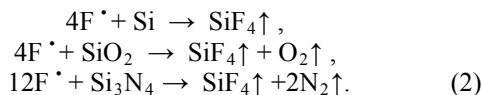
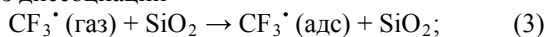


Рис. 2. Профиль углубления, полученного жидкостным химическим травлением

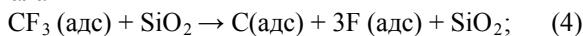
При травлении  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$  дополнительно образуются молекулярные кислород и азот, которые могут вступать во взаимодействие с углеродом, переводя его в летучие соединения типа  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $COF_2$ ,  $CN$ .

Процесс травления  $SiO_2$  с участием радикалов  $CF_3^{\cdot}$  можно представить состоящим из этапов:

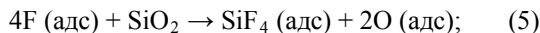
Первый этап – адсорбция радикала на поверхности без диссоциации



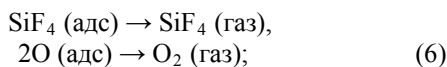
Второй этап – диссоциативная хемосорбция радикала



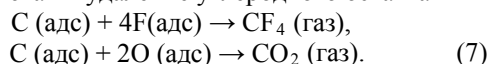
Третий этап – образование молекулы продукта реакции



Четвертый этап – десорбция молекул продуктов реакции



Пятый этап – удаление углеродного остатка



Первый этап происходит практически всегда, так как вероятность захвата радикала  $CF_3^{\cdot}$  на поверхности кварца колеблется в пределах 0,08–0,75, т.

е. от 8 до 75 % радикалов связываются с поверхностью при первом столкновении с ней [3].

Второй этап может оказаться одним из лимитирующих гетерогенную реакцию ПХТ, поскольку прочность связи  $C-F$  достаточно велика ( $E_d = 7,5 \times 10^{-19}$  Дж (4,7 эВ)[3]). Для того чтобы диссоциация произошла, необходимо дополнительное энергетическое воздействие на них, которое в процессах ПХТ практически есть всегда. При обработке в плазме имеет место радиационно стимулированная диссоциация, вызванная воздействием на поверхность обрабатываемого материала ионной и электронной бомбардировки, ультрафиолетового излучения. Эта радиационно стимулированная диссоциация приводит к активации адсорбированных на поверхности фторуглеродных радикалов.

Третий и четвертый этапы – химическая реакция фтора с диоксидом кремния и десорбция образовавшейся молекулы  $SiF_4$  – не создают проблем для протекания реакции ПХТ кварца.

Второй основной лимитирующей стадией процесса ПХТ радикалами  $CF_3^{\cdot}$  оказывается пятый этап – удаление углерода, остающегося на поверхности после диссоциации радикала. Как следует из приведённой формулы, для удаления углерода требуется фтор, который предназначен для травления кварца. В результате из-за возникающего дефицита фтора реакция травления может остановиться, что и наблюдается на опыте[3].

## Методика эксперимента

Исследования технологического процесса глубокого плазмохимического травления пластин монокристаллического кварца проводились на установке «Каролина PE-15», специально разработанной для поставленных задач (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид установки «Каролина PE-15»

Рабочая камера представляет собой реактор плотной плазмы, подробно описанный в [2]. Высоко-частотный индукционный разряд зажигали с помощью ВЧ-генератора ( $f = 13,56$  МГц). ВЧ-мощность изменялась в пределах до 1000 Вт. На столике устанавливалась плоская кремниевая пластина – дер-



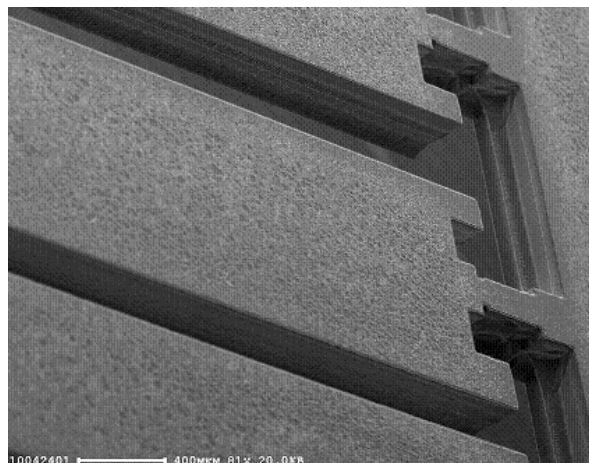
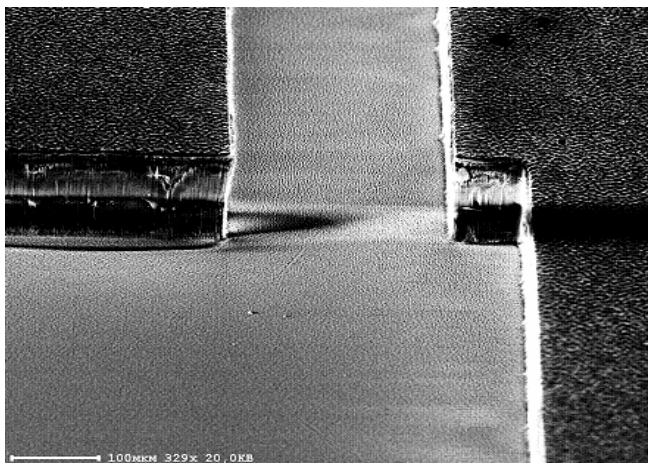


Рис. 4. РЭМ фотографии канавок, полученных плазмохимическим травлением

жатель образцов. Для рассеивания выделяющейся на носителе мощности, на стол осуществлялась подача He, который служил в качестве теплопроводящего агента. Откачка газов осуществлялась турбомолекулярным насосом. Предельный остаточный вакуум составлял  $2 \times 10^{-3}$  Па. Использовалась фторуглеродная химически активная плазма. Контроль скорости и глубины травления проводился с помощью лазерного измерителя глубины травления (ЛИГТ). Управление процессом осуществлялось с помощью аппаратно-программного модуля.

В качестве образцов были использованы кварцевые пластины толщиной 350 мкм (для изготовления чувствительных элементов) с контактными металлизированными масками заданной конфигурации ЧЭ. Образцы подвергались плазмохимическому травлению поочередно с обеих сторон. Заключительный контроль глубины плазмохимического травления и полученного профиля осуществлялся при помощи профилометра PLμ Confocal Imaging Profile.

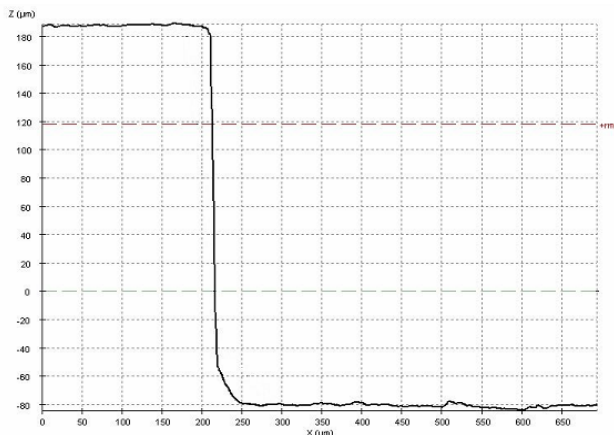


Рис. 5. Профиль углубления, полученного плазмохимическим травлением

## Результаты эксперимента

В ходе работы было проведено более 100 экспериментов по травлению монокристаллического кварца на глубину более 250 мкм. Разработана стойкая маска, позволившая достичь заданной глубины травления. Селективность по отношению к маске  $\sim 80$ . В процессе эксперимента был произведен подбор количественного и качественного состава травящей смеси газов, а также ВЧ-мощностей генератора и столика, обеспечивающие скорость травления до 0,65 мкм/мин при равномерности не хуже  $\pm 5\%$ , на площади обрабатываемой поверхности 5 см<sup>2</sup>. Максимальная глубина травления с одной стороны составила более 250 мкм. Были получены рабочие образцы чувствительных элементов (рис. 4).



Рис. 6. Блок чувствительных элементов после плазмохимического травления

Профиль канавки, полученной плазмохимическим методом травления, приведен на рис. 5. В сравнение с жидкостным методом плазмохимический

имеет ряд отличий: во-первых – отсутствие пирамид и клина травления, характерных для жидкостного травления, во-вторых – наличие дефектного слоя, выраженного легким матированием поверхности углублений (рис. 6). При возможности двустороннего травления практически достигнуто сквозное травление кварцевой пластины толщиной 350 мкм.

Данная работа является первым положительным опытом получения сквозных отверстий в монокристаллическом кварце толщиной до 350 мкм плазмохимическим методом травления. Дальнейшая разработка данной технологии позволит изготавливать МЭМС структуры высокоточные, прецизионные, датчики физических величин, имеющих применение, как в военных технологиях, так и в промышленных.

## Литература

1. Перспективы развития наноэлектронных и микроэлектромеханических систем / НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина / Электронная промышленность, № 3, 2004. С. 15–16.
2. Физико-химические условия в реакторе установки плазмохимического травления и структура установки с индивидуальной (поштучной) обработкой пластин / С. А. Смирнов, П. Р. Шеффер / Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование, 1985. Вып. 11. С. 3–27.
3. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986.



# **СЕКЦИЯ 4**

## **Информационные системы и технологии**

Председатели секции:  
д-р техн. наук А. Н. Гетманец  
д-р техн. наук А. И. Астайкин

---

---

# РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Г. И. Балковая, Е. В. Буренкова, М. К. Смирнов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одним из направлений современной электроники является создание радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), обладающей повышенной стойкостью к воздействию ионизирующих излучений (ИИ). Для обеспечения высокого качества подобной аппаратуры необходимо уже на самых ранних этапах разработки закладывать схемотехнические и конструктивные решения, позволяющие достигать требуемых показателей радиационной стойкости.

Создание радиационно-стойкой аппаратуры – задача комплексная. Ее решение включает в себя целый ряд различных аспектов, среди которых одним из важнейших является выбор радиационно-стойких материалов и электрорадиоизделий (ЭРИ).

Решение данной проблемы возможно путем создания специализированной информационно-справочной системы, содержащей весь объем информации по радиационной стойкости, необходимый для разработки РЭА.

Необходимость в такой информационной системе возникает в процессе работ, связанных с созданием новых перспективных образцов РЭА и вызвана наличием большого объема информации по различным типам ЭРИ. В настоящее время значительная часть такой информации хранится в бумажном виде, при этом довольно затруднительно осуществлять оперативный поиск и подбор ЭРИ с учетом большого количества различных технических требований, предъявляемых к РЭА, в том числе и требований по радиационной стойкости. При накоплении большого объема подобной информации все труднее становится обеспечить ее целостность, удобство хранения

Информационно-справочная система позволяет разработчику РЭА осуществлять оперативный доступ к информации по радиационной стойкости ЭРИ, проводить их эффективный поиск и подбор по заданным уровням воздействия ИИ, выполнять автоматизированную оценку радиационной стойкости РЭА. Все это дает возможность значительно сократить объем трудозатрат, повысить эффективность работы и качество разрабатываемой аппаратуры.

В процессе выполнения данной работы были поставлены следующие задачи:

- разработать структуру информационно-справочной системы;
- разработать программное обеспечение (ПО), позволяющее проводить расчет радиационной стойкости РЭА, а также осуществлять поиск и подбор ЭРИ;

- разработать формы, обеспечивающие эффективный ввод информации в базу данных.

Цель создания информационно-справочной системы: автоматизированный анализ радиационной стойкости РЭА, эффективный поиск и подбор ЭРИ по заданным техническим параметрам, вывод технической информации в требуемой форме.

Актуальность данной работы определена:

- необходимостью повышения достоверности результатов обработки больших объемов справочной информации по различным типам элементов;
- необходимостью сокращения сроков выполнения работ по проверке соответствия ЭРИ требованиям по радиационной стойкости, предъявляемым к разрабатываемой аппаратуре;
- отсутствием программных продуктов выполняющих аналогичные функции.

Подобную информационно-справочную систему, предназначенную для оценки радиационной стойкости, можно использовать в различных областях науки и техники (например, при создании различного оборудования для проведения исследований в области физики высоких энергий, а также при разработке приборов и устройств, предназначенных для объектов космической и атомной техники).

В конкретном случае эта система создавалась для нужд одного из подразделений ВНИИЭФ, занимающегося разработкой специальной РЭА.

Для обеспечения функционирования информационно-справочной системы в соответствии с постановкой задачи, были разработаны структура базы данных и клиентское приложение, обеспечивающее работу с данными.

Данная система разрабатывалась в объектно-ориентированной среде Borland C++ Builder версии 6.0 с использованием языка запросов SQL. Созданная база данных работает под управлением Microsoft Access.

Клиентская часть состоит из программных модулей, форм и различных запросов. При разработке программы большое внимание уделялось созданию удобного дружественного интерфейса для пользователей информационно-справочной системы. Диалог строится при помощи функциональных окон (форм), в которых, наряду с обычными элементами, используются и специфические, специально предназначенные для работы с базами данных.

- Информационно-справочная система (рис. 1):
- имеет открытую модульную архитектуру, позволяющую добавлять новые модули без значительных изменений остальной части программы;
  - позволяет осуществлять ввод, корректировку, поиск и удаление ЭРИ и данных по их стойкости;
  - имеет алгоритм оценки радиационной стойкости РЭА;
  - предоставляет возможность получения полной или выборочной информации о каждом конкретном ЭРИ.

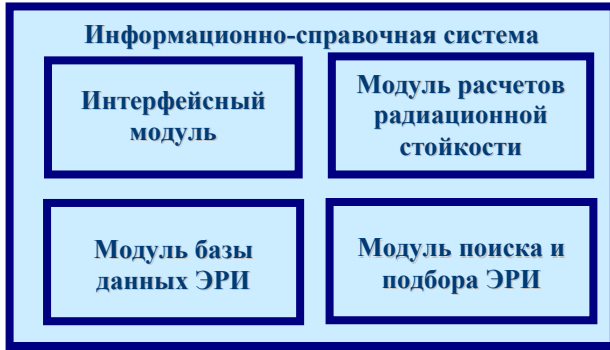


Рис. 1. Структура информационно-справочной системы

Клиентское приложение состоит из двух блоков программ – блока оператора, заполняющего базу данных, и блока пользователей для поиска и оценки данных по радиационной стойкости элементов. Блок пользователей состоит из базы данных с информацией по ЭРИ, программного обеспечения, позволяющего управлять различными поисками, программного модуля, осуществляющего пересчет радиационной

стойкости, а также модуля для поиска и подбора ЭРИ.

Далее приведены назначение и принцип работы функциональных форм, предназначенных для пользователей.

Информационно-справочная система заполнялась данными, взятыми из технических условий и специализированных справочников по радиационной стойкости. Характеристики ИИ в различных источниках (ГОСТах) имеют разное обозначение. Поэтому для удобства пользователей была создана функция пересчета характеристик в соответствии с выбранным ГОСТом. Данная функция реализована в экранной форме «Стойкость элементов к воздействию ИИ» (рис. 2).

Информация, извлекаемая из файлов информационной базы, разбита на логичные блоки данных (группы элементов). Для отображения каждого такого блока в окне «Стойкость элементов к воздействию ИИ» предусмотрена соответствующая тематическая вкладка.

Пользователю представлены следующие вкладки:

- индикаторы знаковинтезирующие;
- излучатели полупроводниковые;
- модули питания;
- тиристоры;
- пассивные компоненты;
- микросхемы;
- транзисторы;
- оптоэлектронные микросхемы;
- диоды и стабилитроны;
- оптопары.

Тип прибора	I1 (7.И1)	I2 (7.И6)	I3 (7.И7)	С1 (7.С1)	С3 (7.С4)	К1 (7.К1)	К3	I4 (7.И12)	УБР (7.И8)	ВПр, мс
2Д409А9/ПН А91/ПН	2У	2У	2У	2У	2У	2У	2У		0,34*1У	20
2Д413А.Б	0,5*1У	0,5*1У	0,5*1У	0,5*1У	1У				0,035*1У	10
2Д419А.Б.В	3У	3У	3У	3У	2У				0,001*1У	10
2Д420А	V гр.	V гр.		V гр.	V гр.	V гр.	V гр.			10
2Д503А ОСМ.Б ОСМ	III гр.	III гр.		III гр.	III гр.					0,05
2Д503А.Б	III гр.	III гр.		III гр.	III гр.					0,05
2Д510А	2,5*4У	4У	50*4У	3У	3У	3У	3У	1,5	0,0001*3У	2
2Д510А1/С0	2,5*4У	4У	50*4У	3У	3У	3У	3У	0,075*98	0,000027*3У	2
2Д520А	3У	2У	3У						0,01*1У	10
2Д520А ОС	3У	2У	3У						0,01*1У	10
2Д522Б	3,4*4У	4У	50*4У		3У	3У	3У	1,5	0,0001*3У	2
2Д522Б ОС	3,4*4У	4У	50*4У		3У	3У	3У	1,5	0,0001*3У	2
2Д531Б-6.А-6	1У	1У	1У	1У	1У	1У	1У		0,000002*1У	0,35
2Д706АС-5	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д706АС9	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д707АС-5	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д707АС9	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д714АС1 АС2	2У	2У	2У	2У	2У	2У	2У		0,01*2У	2
2Д803АС-5	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д803АС9	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У		0,0001*3У	0,1
2Д906А/ББ ОС.Б/ББ ОС.В/ББ ОС	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У	1,5	0,0005*1У	1
2Д906А/ББ Б/ББ В/ББ	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У	1,5	0,0005*1У	1
2Д906А1/ББ ОС.Б1/ББ ОС.В1/ББ ОС	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У	1,5	0,0005*1У	1
2Д906А1/ББ Б1/ББ В1/ББ	3У	3У	3У	3У	3У	3У	3У	1,5	0,0005*1У	1

Рис. 2. Экранная форма «Стойкость элементов к воздействию ИИ»

Все характеристики ЭРИ отображаются в табличной части экранной формы.

Зачастую пользователям необходима информация только по одному из видов ионизирующего излучения (ядерного взрыва, ядерной установки или космического пространства), а остальные данные являются излишними. Поэтому для поиска и просмотра только выбранных характеристик элемента

была разработана экранная форма «Выбор требуемых характеристик ИИ» (рис. 3).

При помощи флажков реализована возможность выбора только необходимых характеристик, значения которых можно просмотреть на экранной форме «Просмотр характеристик ИИ выбранного элемента» (рис. 4).

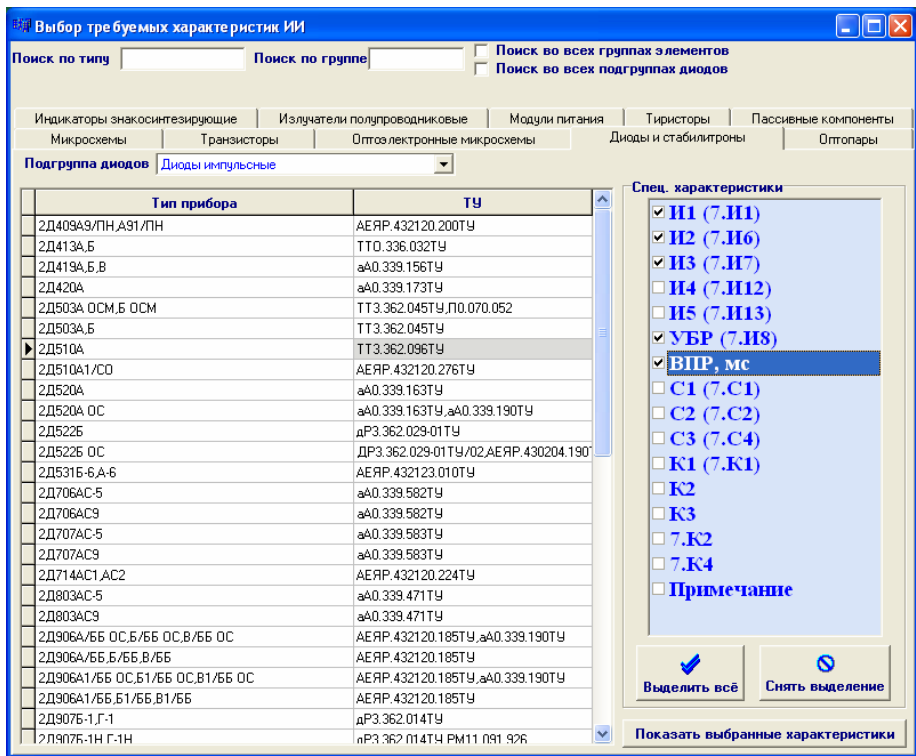


Рис. 3. Экранная форма «Выбор требуемых характеристик ИИ»

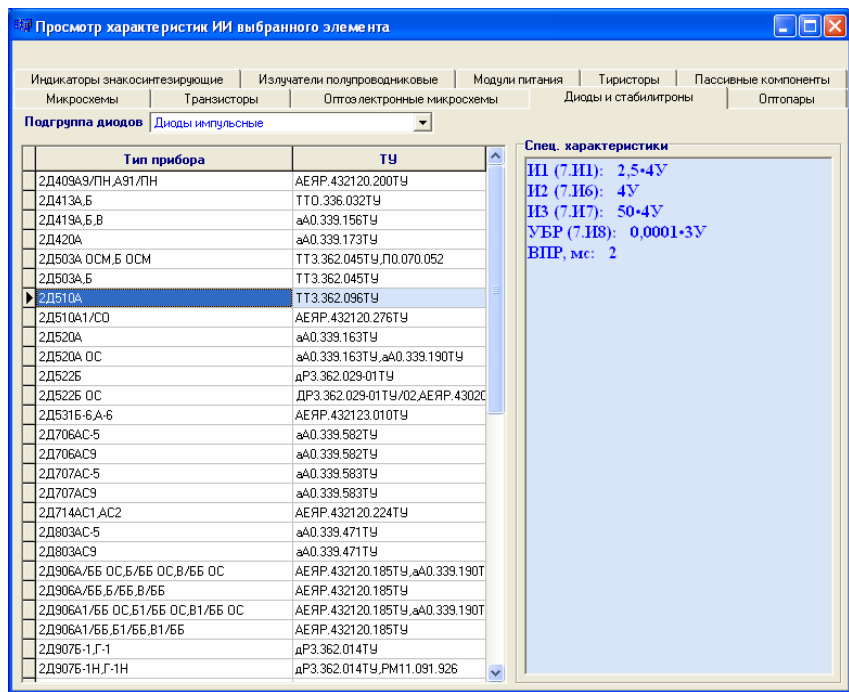


Рис. 4. Экранная форма «Просмотр характеристик ИИ выбранного элемента»

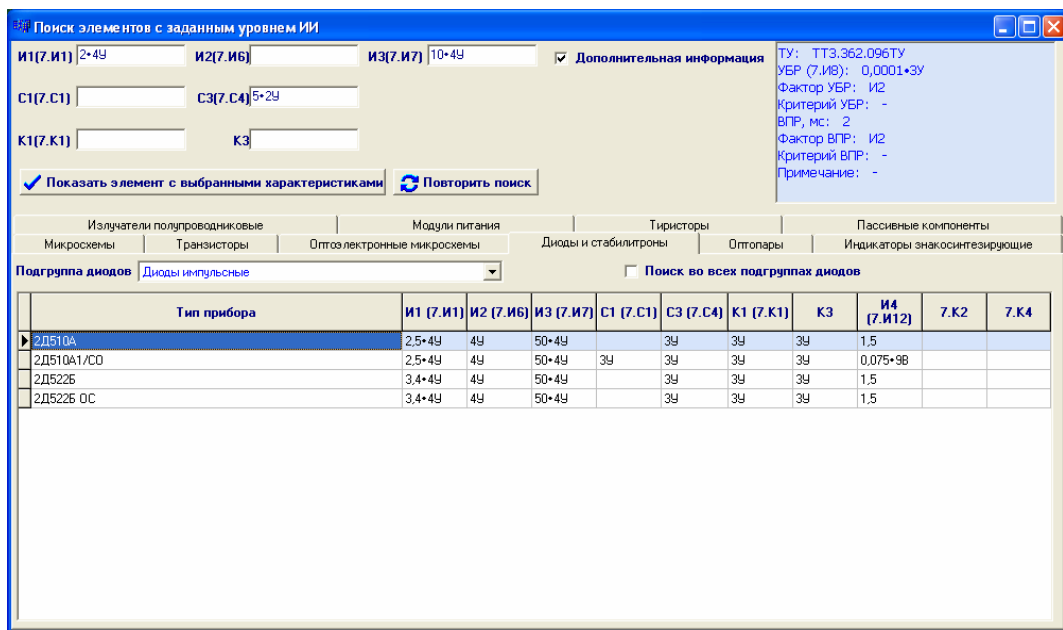


Рис. 5. Экранная форма «Поиск элементов с заданным уровнем ИИ»

С помощью мыши можно осуществлять навигацию по всем группам элементов, при этом будут отображаться только необходимые данные. Это позволит избежать избыточности информации, доступной пользователю.

Для подбора элементов, которые будут применяться в проектируемой аппаратуре с учетом требуемых технических, технологических и конструктивных характеристик, предназначена экранная форма «Поиск элементов с заданным уровнем ИИ» (рис. 5).

На ранних этапах разработки аппаратуры с помощью данной формы можно определить, удовлетворяют ли элементы введенным показателям радиационной стойкости.

Функциональная форма позволяет оценивать радиационную стойкость элементов как по одной, так и по нескольким характеристикам.

Для удобства пользователей создана контекстно-зависимая справочная система (Help), вызываемая по клавише F1, разработанная с помощью приложения Help&Manual 5.

Информационно-справочная система «Оценка радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры» предназначена для проведения комплексной, автоматизированной проверки РЭА на обеспечение

необходимой (заданной) радиационной стойкости. Проверка проводится путем оценки правильности применения ЭРИ в ходе разработки РЭА.

Информационно-справочная система обеспечивает получение информации в заданной форме, исключает ошибки при оформлении отчетных и справочных документов, сокращает сроки выполнения работ по проверке соответствия требований к элементам и повышает достоверность результатов обработки больших объемов справочной информации по различным типам электронных компонентов.

## Литература

1. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И. и др. / Под ред. Ладыгина Е. А. Действия проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Сов. Радио, 1980.
2. Горячева Г. А., Шапкин А. А., Ширшев Л. Г. Действие проникающей радиации на радиодетали. М.: Автомиздат, 1971.
3. Культин Н. Б. С++ Builder. С-Пб.: БХВ-Петербург, 2008.

# УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРНОЙ ОПТОПАРЫ ЗОТ110Б

*В. Н. Баранов, В. А. Рябов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Для устройств передачи данных, разнесенных территориально, т. е. имеющие протяженные (длинные) линии связи, имеет место проблема борьбы с помехами по сигнальной земле. Источником таких помех является разность в потенциалах «схемной земли» приемников (передатчиков). Наиболее действенным методом борьбы с такими помехами – гальваническая развязка в сигнальных цепях или линиях связи.

## Способы реализации гальванической развязки

Все приборы и оборудование аппаратуры передачи данных получают напряжение от своих блоков питания и связаны общей «схемной землей» и индивидуальными шинами заземления. При заземленных корпусах устройств, разнесенных территориально, у каждого из них будет свой потенциал обусловленный падением напряжения на заземляющих проводках и наличием блуждающих токов земли. Все это приводит к возникновению случайной разности потенциалов между приборами канала связи, которая воспринимается аппаратурой как помеха по «схемной земле». Эти проблемы решаются применением гальванической развязки сигнальных цепей от «схемной земли» аппаратуры.

Гальваническая развязка сигнальных цепей – отсутствие связи по постоянному току между ними, «схемной землей» и другими питающими и общими шинами приборов. При этом потенциал сигнальных цепей приборов относительно друг друга может быть весьма значительным, на что и должна быть рассчитана изоляция аппаратуры. Гальваническая развязка может обеспечиваться различными способами, применимость их зависит от требований к напряжению изоляции, особенностей интерфейсов, быстродействия канала. Рассмотрим основные способы реализации гальванической развязки.

Конденсаторная развязка – самый дешевый, но и неэффективный способ развязки, практически не защищающий от помех, а также не обеспечивающий передачу сигналов очень низких частот и постоянного тока.

Трансформаторная развязка не позволяет передавать сигналы постоянного тока и имеет ограни-

ченную полосу пропускания. Напряжение изоляции разделительных трансформаторов, применяемых в интерфейсных схемах, составляет 0,5-2,5 кВ.

Оптическая развязка позволяет передавать как дискретные сигналы в широком диапазоне частот (до предела, обусловленного быстродействием приемника или передатчика), так и постоянную их составляющую. Оптическая развязка, как правило, выполняется на оптронах – комбинациях излучателя (светодиода) и приемника (фотодиода, фототранзистора) в одной микросхеме. Еще лучшую развязку обеспечивают интерфейсы с оптоволоконной связью, где между излучателем и приемником располагается оптический кабель. Полоса рабочих частот может достигать единиц и десятков гигагерц, но такое решение требует дорогостоящих излучателей и приемников, да и линии оптоэлектронной связи рентабельны только при больших длинах.

Следует иметь в виду, что частота переключения микросхем в современной аппаратуре связи достигает десятки мегагерц, а типовое время переключения современных транзисторных оптоэлектронных ключей составляет десятки микросекунд (частота переключения до десятков килогерц) [1].

Приведенный анализ применения гальванической развязки показывает, что наиболее целесообразным для каналов связи средней длины и при сравнительно небольшом объеме передаваемой информации является применение транзисторных оптопар (ТОП).

## Анализ оптоэлектронных ключей

Для работы в аппаратуре передачи данных наиболее подходят (по своим техническим характеристикам) ТОП: ЗОТ102, ЗОТ110, ЗОТ122, ЗОТ123, ЗОТ126, ЗОТ127, ЗОТ131, ЗОТ146, ЗОТ156. Большинство ТОП в своем составе имеют составные транзисторные ключи, собранные по схеме Дарлингтона.

В дальнейшем не рассматриваются ТОП на основе однопереходного транзистора (ЗОТ102), ТОП в бескорпусном варианте (ЗОТ146, ЗОТ156) и ТОП, ключ которых состоит из одного транзистора (ЗОТ123, ЗОТ126), время включения и выключения которых составляет единицы микросекунд, что обеспечивает достаточное быстродействие, но из-за малого выходного тока их использование в каналах

связи проблематично. В ТОП с составным транзистором (ЗОТ110, ЗОТ122, ЗОТ127, ЗОТ131) время включения составляет десятки микросекунд, а время выключения может составлять 100 мкс и более. Время включения и выключения ТОП сильно зависят от значения сопротивления нагрузки, тока включения и сопротивления внешнего резистора, включенного между выводами базы и эмиттера фототранзистора ТОП.

В радиоэлектронных приборах часто используют ТОП ЗОТ110Б. Технические условия (ТУ) нормируют его характеристики переключения на уровне:

а) типовое время включения и выключения составляет 25 мкс и 50 мкс соответственно (при внешнем резисторе, включенном между выводами базы и эмиттера фототранзистора ТОП, с сопротивлением 1 МОм);

б) максимальное время включения и выключения 50 мкс и 100 мкс соответственно (при внешнем резисторе, включенном между выводами базы и эмиттера фототранзистора ТОП, с сопротивлением 1 МОм);

в) типовое время включения и выключения, при внешнем резисторе, включенном между выводами базы и эмиттера фототранзистора ТОП, с сопротивлением 0,1 МОм, составляет 10 мкс и 15 мкс соответственно.

Проведенные исследования показали, что время включения ТОП ЗОТ110Б при токе включения 12 мА, токе коллектора 40 мА, сопротивлении нагрузки 510 Ом и сопротивлении внешнего резистора, включенного между выводами базы и эмиттера фототранзистора ТОП, 680 кОм составляет около 2 мкс, а время выключения  $\geq 5$  мкс.

Исследованиям подвергались более 100 штук ТОП ЗОТ110Б различных партий.

Результаты исследований подтвердили закономерность распределения времени включения и выключения (что хорошо коррелируется с характеристиками, приведенными в ТУ). В результате приведенных данных можно сделать вывод, что фактическое значение времени включения ТОП существенно меньше времени выключения. При этом время включения ТОП можно уменьшить за счет увеличения тока управления через светодиод (в пределах доступных значений по ТУ). А вот время выключения корректировать простыми способами возможности нет.

Очевидно, что существенный вклад в снижение быстродействия ТОП вносит время их выключения.

### **Анализ путей уменьшения времени выключения ТОП**

Известно, что для уменьшения времени выключения фототранзистора, работающего в качестве ТОП, необходимо предотвращать насыщение базы фототранзистора и (или) ускорить рассасывание заряда неосновных носителей в базе.

Существует в основном два варианта схемотехнического решения уменьшения времени переключения ТОП [2]:

а) шунтирование вывода базы на вывод эмиттера фототранзистора с использованием ТОП, что уменьшает сопротивление разрядной цепи для базового тока фототранзистора;

б) подача на базовый вывод фототранзистора потенциала обратной полярности по отношению к открывающему импульсу, т. е. форсированное рассасывание избыточного заряда в базе фототранзистора ТОП.

Однако следует иметь в виду, что время нарастания и спада имеют физический предел, эти времена не могут быть меньше времени пролета носителей заряда через базу фототранзистора.

### **Выбор и обоснование предлагаемого варианта увеличения быстродействия ТОП ЗОТ110Б**

Рассмотрим возможность применения указанных вариантов увеличения быстродействия ТОП для ЗОТ110Б:

а) шунтирование базового вывода на вывод эмиттера фототранзистора с использованием ТОП; этот вариант может быть применим, но эффект его применения не так велик, как хотелось бы;

б) подача на базовый вывод фототранзистора потенциала обратной полярности по отношению к открывающему импульсу; этот вариант был выбран для применения, так как в ТОП база фототранзистора доступна для подачи запирающего напряжения.

В качестве генератора запирающего напряжения было предложено использовать фотодиод диодной оптопары (ДОП). При этом в качестве запирающего напряжения для транзистора выступает фото-ЭДС фотодиода ДОП. Так как этот фотодиод гальванически не связан со схемой управления, то гальваническая развязка сохраняется.

В качестве генератора фото-ЭДС ТОП была выбрана ДОП ЗОД101А.

### **Практические результаты исследования варианта увеличения быстродействия ТОП ЗОТ110Б**

Для проверки данного предложения был собран действующий лабораторный макет, по схеме [3], приведенной на рис. 1.

Управление ДОП ЗОД101А осуществляется от цепи управления ТОП ЗОТ110Б, по срезу управляющего импульса. В качестве источника управляющего сигнала используется одновибратор, собранный на микросхеме КР1533АГ3 и формирующий импульсы длительностью  $\approx 5$  мкс.



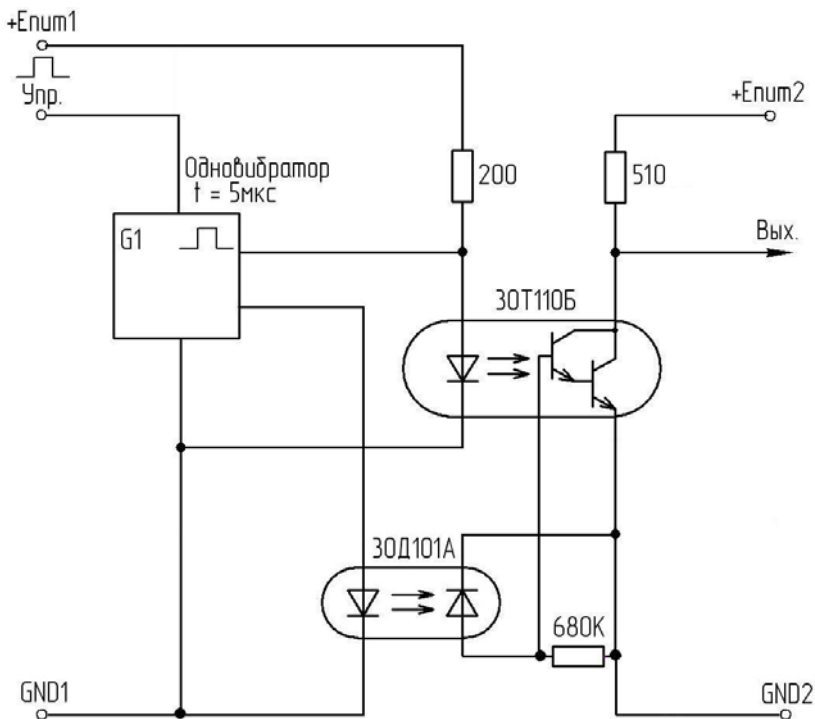


Рис. 1. Схема макета

Исследование работы действующего лабораторного макета показало, что при частоте управляющих сигналов 100 кГц время включения и выключения не превышают 0,95 мкс и 1,06 мкс соответственно. Такое уменьшение времен переключения дает существенные выигрыши в скорости работы ТОП 3ОТ110Б, что позволяет в несколько раз увеличить скорость передачи информации в канале связи по сравнению с значениями, указанными в ТУ.

### Заключение

1. Предложенный вариант схемотехнического решения увеличения быстродействия ключей позволяет существенно повысить скорость передачи информации и является экономически оправданным.
2. Возможно использование во всех отраслях науки и техники в новых разработках, а так же где

необходима модернизация канала связи (на ТОП 3ОТ110Б) с целью увеличения его пропускной способности.

3. В настоящее время на предлагаемое решение получен патент на изобретение [3].

### Литература

1. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977.
2. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005.
3. Патент РФ № 2 395 160. Оптоэлектронный ключ / В. Н. Баранов, В. А. Рябов, В. Н. Булгаков // Бюллетень. 2010. № 20

# ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОГО ПАКЕТА И РАЗРАБОТКА РЕГЛАМЕНТА РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕКОТОРЫХ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

*А. В. Васькин, В. Л. Ведерников*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

При работе со сложным инструментом, таким как расчетный пакет АРМ Winmachine, необходимо быть уверенным, что обеспечены:

- отсутствие ошибочных действий оператора, вводящего данные;
- отсутствие внутренней ошибки в программе;
- отсутствие ошибки в аппроксимации задачи и построении алгоритма работы с расчетным пакетом;
- правильно восприняты результаты расчетов.

Эти требования определяют уровень доверия к результатам расчетов, особенно на предприятии, в котором предъявляются особые требования к прочности и надежности конструкции.

## Общие положения

Чтобы обеспечить заданную точность и правильность выполнения поставленной задачи необходимо провести определенный набор работ:

1. Верификация расчетного пакета, которая включает:

1.1. Выделение круга задач, решаемых разработчиком.

Этот круг задач ограничен возможностью верификационных исследований, подтверждающих правильность и заданную точность их решений.

Определено два круга задач:

- определение первых частот собственных колебаний печатных плат жестко закрепленных в корпусе с учетом массовых характеристик ЭРИ;
- анализ элементов конструкции на прочность при статическом нагружении (рассматриваются только некоторые элементы крепления).

1.2. Используя статистические законы, проведение выборки из круга задач, достаточной для определения расхождения экспериментальных и расчетных данных.

Выборка была проведена, были определены критерии достаточности как по количеству расчетов так и по методам верификации.

1.3. Определение максимальной и средней погрешности при расчете.

Этот пункт был выполнен только частично, при калибровке пакета АРМ Winmachine было определено только общее состояние вопроса о погрешности при работе с этим пакетом.

1.4. Определение критериев качества выполняемых расчетов, и факторов, влияющие на них.

Определены факторы, влияющие на критерии качества, которые отображены в выпущенном отчете [1].

2. Создание отчета с методическими рекомендациями, которые позволят использовать данный пакет при работе.

Отчет с методическими рекомендациями выпущен [1].

3. Создание регламента по использованию расчетного пакета на основании отчета с методическими рекомендациями, в котором будут подробно расписаны все действия разработчика для получения результата с заданной точностью.

Регламент в общем виде уже существует, однако, его необходимо дополнить примерами по конкретному решению наиболее часто выполняемых задач (по две задачи на каждый регламент).

Были выявлены недоработки в работе пакета АРМ Winmachine, которые могли привести к ошибке, особенно если с этим пакетом работает не специалист в области расчетов, а инженер-конструктор.

4. Создание заявки на верификацию и валидацию (аттестацию) пакета.

К заявке будет приложен верификационный отчет, в котором результаты расчета данного расчетного пакета будут сравниваться с данными, полученными с использованием других верифицированных методик и с экспериментальными данными.

5. Рассмотрение материалов аттестационной комиссией и присвоение пакету аттестационного Паспорт ПС (программного средства).

6. После проведения аттестации, именно та версия пакета, которая подвергалась этим проверкам, далее носит название «замороженная», имеет официальное разрешение на использование на предприятии при условии строгого выполнения следующих требований:

- 6.1. Разработчик ознакомлен с описанием пакета.
- 6.2. Разработчик неукоснительно выполняет регламент по работе с пакетом.
- 6.3. Задачи не выходят из круга задач для которых проводилась верификация пакета.

С разработчиками пакета АРМ Winmachine существует договоренность по «заморозке» следующей версии пакета, которая будет значительно расширена функционально. Так, например, будет существовать как 32-битная так и 64-битная версия пакета, в 64-битной будет отсутствовать ограничение по количеству рассчитываемых узлов.

### **Общие проблемы верификации и валидации**

Существует документ, который определяет порядок верификации и валидации расчетных средств при работах, связанных с ядерными объектами гражданского (не военного) применения [2]. В нем расписан порядок мер, необходимых для верификации и валидации пакета и определен состав комиссии.

На нашем предприятии функции и состав комиссии по верификации расчетных программ официально не определен, а также не определен порядок и объем мер необходимых для верификации и валидации. То есть существует необходимость создания подобного документа, адаптированного к требованиям нашего предприятия.

Ни один коммерческий расчетный пакет не проходил еще верификацию и валидацию для решения специфических задач, решаемых в нашем отделении, но есть положительные примеры решения этих проблем на смежных предприятиях и организациях.

### **Выводы**

Необходимо понимать, что данные, полученные при использовании расчетного пакета, никогда не заменят результатов, полученных при испытаниях,

а тем более полученных при эксплуатации опытного образца в реальных условиях, при этом:

- в процессе разработки эскизного проекта расчетные данные дают возможность точно определять проблемные места конструкции, каждый раз, когда вносятся существенные изменения;

- во время разработки конструкторской документации конструктор уже знает, на какие элементы конструкции обратить особое внимание;

- в испытаниях использовать прибор, который уже имеет расчетные данные по надежности; это позволит при испытаниях не проверять прибор на работоспособность в условиях заданных по ТЗ, а лишь подтвердить данные, полученные при расчетах;

- в процессе испытаний будут известны наиболее опасные виды испытаний и типы нагрузок, что упрощает и удешевляет испытания; нет необходимости в полном перечне испытаний, например, вибрационные испытания на вибростенде проводить не во всех возможных направлениях, а только в двух, наиболее опасных и следить не за всеми элементами конструкции, а за выявленными как «проблемные».

### **Литература**

1. 7721,ОТН1-2009 Отчет о научно-исследовательской работе. Калибровка пакета АРМ Winmachine в области поиска первых собственных частот колебаний печатных плат.

2. РД-03-17-2001 Положение об аттестации программных средств, применяемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Госатомнадзор России.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ВИДЕОСИСТЕМА КОНТРОЛЯ И РЕГИСТРАЦИИ ПРОЕЗДА АВТОТРАНСПОРТА

А. А. Городнов, И. А. Елисеев, И. В. Жуков, М. Р. Мочалов, С. В. Сорокин, В. Н. Мурин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время в России и в мире всё больший размах приобретают разработки устройств с встроенной видеоаналитикой (этот термин широко используется в специальной литературе для обозначения возможности устройств производить встроенный анализ формируемых в них видеоданных). Можно смело прогнозировать в ближайшие годы бурный рост применения таких технических средств и сопутствующие этому росту революционные изменения в идеологии и структуре систем наблюдения и технического зрения. Тот факт, что ВНИИЭФ оказался в числе лидеров в такой современной области развития информационных технологий, как встраиваемая видеоаналитика, заслуживает внимания, а также заботы о сохранении и развитии достигнутого уровня. Лидерский статус получен благодаря разработке интеллектуального визуального датчика (ИВД), выполненной сотрудниками ИЯРФ в рамках проекта МНТЦ № 3195.

ИВД (рис. 1) представляет собой компактное устройство [1], которое содержит видеосенсор и микропроцессор с загружаемым программным обеспечением (ПО). ИВД предназначен для обнаружения событий, таких, например, как появление человека или автомобиля в поле зрения камеры, обнаружение дыма, тумана, пара или огня, слежение за автомобилями и т. д. Функция ИВД определяется перезагружаемым ПО.

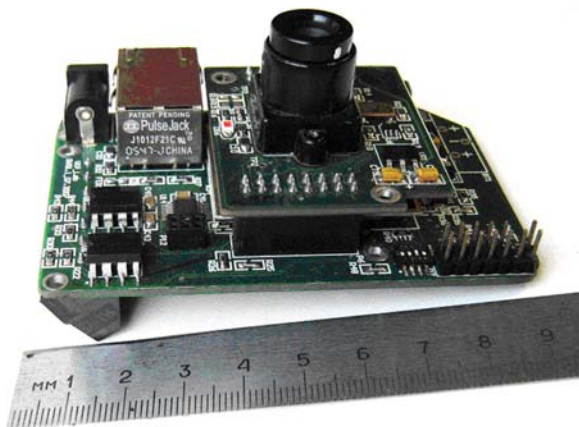


Рис. 1. ИВД без корпуса

Цель работы – создать алгоритмы и программную реализацию технологии автоматического визуального контроля проезда автотранспорта на базе встроенного в него микропроцессора.

## 1. Постановка задачи

Задача – силами ИВД осуществить независимый автоматический контроль проезда автотранспорта. Примером подобной установки ИВД может быть въезд на склад, подземную парковку или любую другую охраняемую территорию.

ИВД должен выполнить следующие функции:

- круглосуточно наблюдать за въездом/выездом, при этом уметь четко отделять одно от другого;
- обнаруживать факт въезда/выезда каждого отдельного транспортного средства;
- сохранять один стоп-кадр каждого события (въезд/выезд) на удаленном ПК средствами локальной компьютерной сети;
- сопровождать каждый сохраняемый кадр информацией о времени события;
- обеспечивать регистрацию изображений в ракурсе, пригодном для опознавания транспортного средства, и, по возможности, визуального анализа наличия груза.

Постановка задачи выдвигает следующие критические требования к технологии:

- технология должна работать в автоматическом режиме (не требовать сопровождения своей работы оператором в течение любого времени сбора и накопления данных);
- технология должна работать в режиме реального времени;
- технология должна работать в круглосуточном режиме и круглогодичном режиме, без необходимости ручной перенастройки.

## 2. Разработка алгоритма и его программная реализация

Многие алгоритмы обнаружения объекта в кадре обычно основаны на использовании опорной сце-

ны. Опорная сцена, в которой объект заведомо отсутствует, запоминается и затем используется для сравнения с текущим кадром. Анализируя их различие, можно сделать вывод о присутствии объекта.

Такой подход подразумевает неизменность опорной сцены и приемлем, например, внутри помещений со стабильным освещением. При наружном применении стабильности освещения нет – сумерки, заход солнца за тучу и т. п.

В процессе анализа тестовых видеороликов выяснилось, что в поле зрения, кроме автомобилей, могут двигаться различные другие объекты: люди (охранник, шофер), собаки, птицы, тени, отражения в лужах, круги от капель дождя на лужах и т. д. Особый случай представляет опавшая листва, которую порыв ветра двигает как большую единую массу.

Исходя из анализа подобных ситуаций, был сделан вывод, что алгоритмы на основе опорной сцены в данном случае неприменимы. Следовательно, требовалось разработать совершенно новый алгоритм, который бы не зависел от освещенности сцены и от резких изменений освещенности – таких как «включено искусственное освещение», «сцена осветилась фарами въезжающего автомобиля».

### 3. Логика принятия решения

Основная задача алгоритма, который требовалось разработать, – определить момент, когда машина присутствует в кадре с оптимальным ракурсом, и именно в этот момент дать команду на фотографирование. Дополнительные задачи: не делать повторные фото для той же машины, минимизировать ложные срабатывания.

## 4. Измерение вектора движения

### 4.1. Алгоритм многозонального трекинга

Для нахождения вектора движения был разработан специальный алгоритм. Суть его в следующем. В кадре расставляются зоны, полутоновые образы которых запоминаются. В следующем кадре для каждого образа организуется область поиска и путем сканирования внутри этой области ищется местоположение, в котором образ максимально похож на заданный. Размер области поиска выбирается равным максимально возможному смещению автомобиля между кадрами (это зависит от максимальной скорости движения автомобиля, частоты кадров и размерности изображения). Затем определяется вектор смещения для каждого образа поиска и по всем локальным векторам вычисляется общий (усредненный) вектор смещения.

## 4.2. Предварительная обработка изображения

С целью экономии вычислительных ресурсов ИВД была исследована возможность работы с редуцированным изображением: в 4 раза по горизонтали и в 4 раза по вертикали. Дальнейшее тестирование показало, что алгоритм вполне устойчиво работает и с редуцированным изображением (рис. 2,б).

Для успешного поиска заданного образа важно выбирать те места, где есть значительные неоднородности по яркости. Для автомобиля это фары, номерной знак, радиатор и т. п.

С целью выделения мест с такими неоднородностями изображение предварительно подвергалось высокочастотной фильтрации. Выбор был остановлен на фильтре Собеля. Поскольку фильтр Собеля зависит от направления, аналогично пространственному дифференцированию, он был модифицирован так, чтобы свертка осуществлялась за один проход по матрице изображения.

Дальнейшие этапы подготовки изображения к выбору зон трекинга следующие. Результат такой фильтрации дискриминируется по некоторому порогу (рис. 2,г). Этим фактически достигается независимость от освещенности сцены. Значение порога, как было выяснено экспериментально, может варьироваться в достаточно больших пределах – от 20 до 120 в терминах байта (0 – 255), результат практически одинаков.

Далее из текущего кадра производится попиксельное вычитание предыдущего кадра (оба преобразованы фильтром Собеля), причем если результат меньше нуля, то он приравнивается к нулю (рис. 2,а). Этой операцией отсекаются все неподвижные части изображения.

Затем изображение подвергается медианной фильтрации с окном 3×3 пикселя, что позволяет убрать шум (рис. 3,б).

После всех этих предварительных операций изображение готово для назначения зон трекинга.

### 4.3. Назначение зон трекинга

В качестве областей изображения для отслеживания движения объекта нужно выбирать такие, где наблюдаются значительные перепады интенсивности. После предварительной обработки мы имеем изображение с черными (значение байта равно нулю) и белыми (значение байта равно 255) областями, причем белые области как раз и соответствуют нужным требованиям.

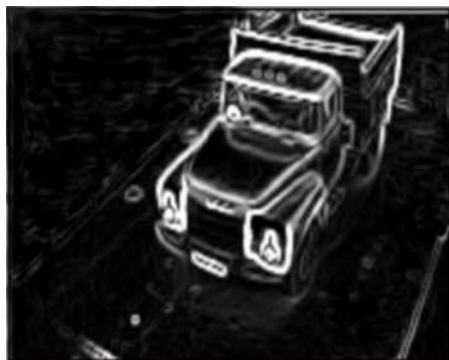
Выбор зон производится следующим образом. Сначала все изображение делится на регулярные зоны, примерно 15×10 зон. Зоны, где все пиксели имеют нулевое значение, отбрасываются. Для ненулевых зон производятся следующие операции:



а



б



в



г

Рис. 2. Предварительная обработка кадра: а – исходный кадр; б – 4×4 – редуцированный кадр; в – после обработки модифицированным фильтром Собеля; г – бинаризованный кадр



а



б



в



г

Рис. 3. Предварительная обработка кадра (продолжение), назначение зон и трекинг: а – вычтен предыдущий кадр; б – после специализированной медианной фильтрации; в – расположение зон трекинга; г – локальные векторы смещения после трекинга зон

- определяются координаты центра тяжести;
- центр зоны переносится в точку центра тяжести (рис. 4);
- вычисляется дисперсия по  $X$  и  $Y$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{x,y} (x - x_{wc})^2 P_{x,y}}, \quad (1)$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{x,y} (y - y_{wc})^2 P_{x,y}}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь суммирования,  $P_{x,y}$  – значение пикселя;

- если дисперсия по какому-то измерению мала, тогда ее значение приравнивается минимальному (при размере кадра  $188 \times 120$  минимальное значение равно 6);
- размер зоны по  $X$  и  $Y$  выставляется равным значению дисперсии.

После этого образ фрагмента полутонового изображения, соответствующий данной зоне, запоминается для его поиска на следующем кадре.

Пример назначенных зон трекинга приведен на рис. 4,в.

#### 4.4. Алгоритм поиска заданного образа

Пусть задан образ для поиска в виде прямоугольного фрагмента полутонового изображения. Требуется на другом изображении найти место, на которое заданный образ для поиска максимально похож. Для этого нужно ввести меру «похожести»  $M$ . В качестве такой меры обычно принимают норму вида:

$$M = \sum_{x,y} |P1_{x,y} - P2_{x,y}|, \quad (3)$$

где  $P1$  и  $P2$  – значение пикселя в одном и другом изображениях.

Для поиска нового положения образа следует просканировать район поиска на изображении и найти то место, где норма минимальна.

#### 4.5. Вычисление параметров вектора движения

После трекинга всех зон и вычисления вектора смещения для каждой из них вычисляется средний по всем зонам трекинга вектор движения. Затем вычисляется его проекция на главное направление движения – примерно  $40^\circ$  к оси  $X$  при данном ракурсе установки видеодатчика (рис. 5).

При анализе состояния сцены будет учитываться как знак этой проекции, так и ее амплитуда.

#### 5. Измерение дополнительных параметров

Одного вектора движения недостаточно для идентификации автомобиля, так как в том же направлении может двигаться, например, охранник. Поэтому измеряются еще площадь изменений  $S$ , координаты центра тяжести изменений, а также дисперсия по  $X$  и по  $Y$  [2].

Площадь изменений вычисляется простым взвешиванием кадра после всех фильтраций (рис. 4,б), с учетом перспективы (рис. 5).

Дисперсия изменений вычисляется по формулам (1), но по всему кадру.

Все измеренные параметры подвергаются усреднению по времени. Это необходимо, чтобы сгладить «дребезг». Для вектора движения, в случае хаотического изменения его направления, усреднение даст малую величину, в противном случае отразит стабильность его направления. Параметры записываются в кольцевой буфер (для каждого параметра свой буфер), длина которого равна времени усреднения в терминах числа кадров, и в каждый момент времени величина параметра принимается равной среднему значению по всему буферу.

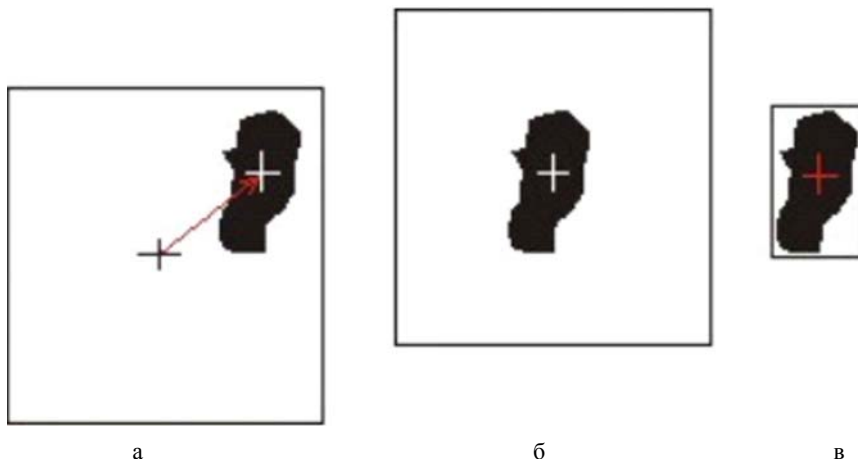


Рис. 4. Назначение зон трекинга: а – регулярная зона; б – перенос центра зоны в точку центра тяжести; в – изменение размера в соответствии со значениями дисперсии



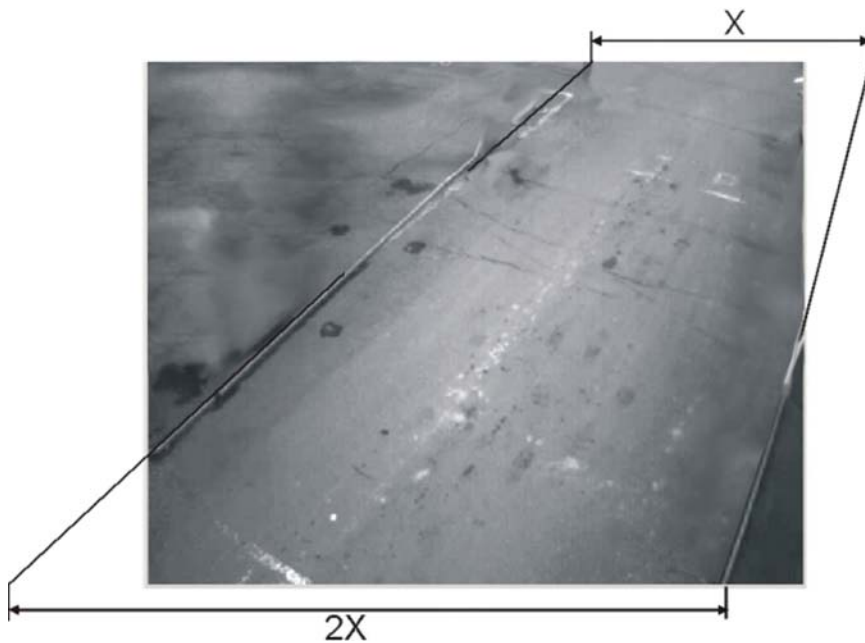


Рис. 5. К учету перспективы при вычислении площади изменений

## 6. Анализ состояния сцены

Для анализа состояния сцены выбраны следующие величины.

1. Вектор движения  $V$ . Его большая амплитуда говорит о том, что объект уверенно движется в течение нескольких кадров в неизменном направлении. Знак проекции вектора свидетельствует о направлении движения: положительное значение – движение слева направо; отрицательное значение – движение справа налево.

2. Площадь междукадровых изменений  $S$  свидетельствует о величине движущегося объекта. Сравнивая его с пороговым значением, можно отличить человека от автомобиля.

3. Координаты центра тяжести изменений ( $X_{wc}$ ,  $Y_{wc}$ ). Если центр тяжести находится в левом нижнем углу, значит, либо машина въезжает слева, либо уезжает налево. Если он находится в правом верхнем, значит, либо машина въезжает справа, либо уезжает направо.

4. Дисперсия по горизонтали и вертикали говорит о вытянутости объекта. Для охранника  $\delta x > \delta y$ , для автомобиля  $\delta x < \delta y$ .

Введем понятие «Состояние сцены». Сцена может иметь следующие состояния

1. «Въезд слева».
2. «Уезд направо».
3. «Въезд справа».
4. «Уезд налево».
5. «Нет движения».

Объединяя все вышеприведенные заключения, получаем логику анализа состояния сцены, приведенную на рис. 6.

## 7. Тестирование алгоритма

Первоначально алгоритм создавался на ПК в среде Borland Delphi и тестировался на большом числе отснятого видеоматериала: в ночных условиях, в условиях снегопада и дождя, в условиях напряженного автомобильного движения. Видеоролики снимались как высококачественной цветной видеокамерой (25 кадров в секунду), так и с использованием самого ИВД. Затем алгоритм был перенесен на платформу ИВД и уже окончательно протестирован[3][4].

Для финального тестирования алгоритма был выбран 24 часовой временной интервал, что позволило провести испытание и в дневное и в ночное время суток. Всего за это время в поле зрения ИВД проехала 121 машина.

Результат тестирования приведен в таблице.

Результат тестирования

Зарегистрировано фото	149	
Зарегистрировано машин	121	100 %
Правильно идентифицировано	108	87 %
Повторных срабатываний	22	17 %
Ложных срабатываний	4	3 %

Как видно из приведенных результатов, достоверность работы алгоритма вполне приемлема.



Рис. 6. Логика принятия решений

## 8. Заключение

Проведена разработка экономичного и высокоэффективного алгоритма контроля проезда автотранспорта, отлажена программная реализация алгоритма, и на практике проверена работоспособность технологии контроля с использованием встроенной видеоаналитики в реальных (всепогодных) условиях эксплуатации. Алгоритм основан на анализе градиентов яркости, обладает устойчивостью к самым разным изменениям освещенности и погодным условиям. Ресурсоемкость алгоритма соответствует вычислительному потенциалу встроенного в ИВД микропроцессора, что позволяет ему вести непрерывный круглосуточный и круглогодичный контроль в режиме реального времени.

## Литература

1. Жуков И. В., Ершков А. А. и др. Разработка лабораторного образца интеллектуального визуального датчика // Доклад на VI-й научно-технической конференции «Молодежь в науке», г. Саров, 30 октября – 1 ноября 2007 г. С. 53.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. - В двух книгах.
3. Жуков И. В., Елисеев И. А. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615153, «Программа управления и контроля интеллектуального визуального датчика», 24.10.2008.
4. Жуков И. В., Мочалов М. Р., Елисеев И. А., Городнов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010612908, «Программа для распознавания и регистрации автотранспортных средств», 14.07.2010.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ АРХИТЕКТУР В РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*А. С. Даниленко, М. А. Марунина, В. И. Гунин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Существует несколько подходов к организации архитектуры программного обеспечения: модульное программирование, распределенные вычисления, программное обеспечение с сервис-ориентированной архитектурой **SOA**.

Создавая комплексы программ, разработчики программного обеспечения часто сталкиваются с проблемой наращивания или сокращения функций программы, повторного использования отработанных решений для различных заказчиков.

В случае разработки программного обеспечения как целостной неделимой структуры приходилось бы переписывать программное обеспечение для разных заказчиков.

**SOA** позволяет создавать комплексы программ функционирования с заданным количеством функций из ранее созданных сервисов, обеспечивающих работу той или иной задачи.

**SOA** представляет собой гибкий набор принципов проектирования, применяемых на этапах масштабирования и интеграции систем. Система, развернутая на базе **SOA**, предоставляет свободно интегрируемый комплекс сервисов, которые могут быть использованы во многих областях деятельности.

**SOA** определяет, как интегрировать приложения, разработанные для разных платформ в *web*-пространстве. Вместо определения интерфейса прикладного программирования **API** **SOA** определяет интерфейс в терминах протокола и функциональности приложения.

Сервис-ориентация не учитывает связей сервисов с операционными системами и прочими технологиями, лежащими в основе приложений. **SOA** разделяет функциональность в различные модули или сервисы, которые можно сделать доступными через сеть, что позволит пользователям комбинировать и использовать их для создания приложений. Данные сервисы и связанные с ними потребители общаются друг с другом, передавая информацию в четко определенном общем формате или координируя активность двух и более сервисов [1–3].

Например, несколько отделов в компании разработки программного обеспечения могут разрабатывать и разворачивать **SOA**-сервисы на различных языках программирования, при этом их клиенты получают преимущество легкого, понятного и хорошо определенного интерфейса доступа к данным. Для взаимодействия с **SOA**-сервисами принято использо-

вать *xml*-формат обмена данными, но это не является обязательным требованием.

**SOA** можно представить себе как своего рода непрерывную совокупность самостоятельных сервисов, в противовес распределенным вычислениям или модульному программированию. Это означает, что один и тот же сервис может использоваться в нескольких комплексах, которые будут обращаться к нему через постоянный адрес, и точно так же один сервис может объединять информацию, полученную от нескольких сторонних сервисов.

Таким образом, сервисы образуют единую непрерывную сеть, на которую опираются реализации **SOA**. Сервисы представляют собой не объединенные, слабо связанные единицы функциональности без встроенных вызовов друг к другу. Каждый сервис выполняет одно действие, например, онлайн заполнение приложения для счета или онлайн просмотр банковского баланса, или заказ авиабилетов по сети. Вместо того, чтобы содержать встроенные вызовы друг к другу в исходном коде, сервисы используют определенные протоколы, описывающие, как сервисы передают и анализируют сообщения, применяя метаданные.

Разработчики **SOA** объединяют отдельные **SOA**-объекты, используя оркестрацию, т.е. исполнение специальным контейнером логики связывания нескольких сервисов [2]. В процессе оркестрации разработчик объединяет программную функциональность (сервисы) в неиерархической компоновке, применяя инструментарий, содержащий полный перечень доступных сервисов, их характеристики и средства для создания приложения, использующего эти источники.

Метаданные сервисов должны быть достаточно детализированы, чтобы описывать не только характеристики сервисов, но также данные, управляющие ими. Программисты расширили использование расширяемого языка разметки **XML** в **SOA**, чтобы упорядочивать данные в рамках описанного контейнера. Язык описания *web*-сервисов (**WSDL**) обычно описывает сами сервисы, в то время как протокол **SOAP** описывает протоколы связи. **SOA** зависит от данных и сервисов, описанных при помощи метаданных, которые должны отвечать следующим критериями:

1. Метаданные должны включаться в форме, которую программные системы смогут использовать для динамического конфигурирования, находя и

объединяя описанные сервисы, в то же время под-держивая их логичность и целостность. Например, метаданные могут быть использованы другими приложениями в качестве каталога, предоставляя возможность самоопределения сервисов без необходимости модификации функционального контракта сервиса.

2. Метаданные должны поступать в форме, которую разработчики системы могут понимать и управлять с приемлемыми затратами сил и средств.

SOA предоставляет разработчикам возможность объединять довольно большие части функциональности, чтобы формировать для того или иного заказчика приложения, почти целиком построенные из существующих программных сервисов. Чем больше эти части, тем меньше требуется точек взаимодействия, чтобы обеспечить любой требуемый набор функциональности; в то же время слишком большие части могут оказаться неприменимы для дальнейшего использования. Каждый интерфейс влечет за собой некоторое количество дополнительной обработки, поэтому требуется тщательное рассмотрение выбора степени структурирования функциональности. Предполагается, что в перспективе маргинальная стоимость создания N-ного приложения станет невысокой, так как все требуемое программное обеспечение (ПО) уже существовало в составе других приложений. В идеале для производства нового приложения потребуется только оркестрация.

Основные правила для разработки, поддержки и использования SOA определяются следующими ведущими принципами:

1. Повторное использование, степень структурирования, модульность, компонентное представление и способность к взаимодействию.

2. Соответствие стандартам (общим и характерным для отрасли).

3. Идентификация и категоризация, подготовка к работе и передача заказчику и мониторинг сервисов.

Конкретная тематика работы влияет на внутреннее поведение системы, стиль ее проектирования, а также на архитектурные принципы проектирования и определения служб:

1. *Инкапсуляция сервисов* — множество сервисов объединены для использования под SOA. Часто такие сервисы не были изначально предназначены для SOA.

2. *Слабые связи между сервисами* — сервисы поддерживают отношения, минимизирующие зависимости, и требуют только осведомленности друг о друге.

3. *Контракты сервисов* — сервисы придерживаются соглашений о коммуникациях, определенных в одном или нескольких документах, описывающих сервисы.

4. *Абстракция сервисов* — сервисы прячут логику работы от внешней среды, за исключением описаний в контрактах сервисов.

5. *Повторное использование сервисов* — логика разделена между сервисами для дальнейшего использования.

6. *Компонуемость сервисов* — коллекции сервисов могут быть скоординированны и собраны в составные сервисы.

7. *Автономия сервисов* — сервисы контролируются инкапсулируемую в них логику.

8. *Оптимизация сервисов* — при всех прочих равных, сервисы более высокого качества обычно предпочтительнее низкокачественных.

9. *Открытость сервисов* — сервисы спроектированы быть внешне наглядными, чтобы их можно было найти и получить к ним доступ через доступные механизмы поиска.

10. *Релевантность сервисов* — функциональность, представленная на уровне модульности, представляется существенной для пользователя.

Рассмотрим частный случай применения сервис-ориентированного программирования, а именно модуль договоров, являющийся частью комплекса программ функционирования «АРМ Метролога».

Для отделения модуля договоров от проекта «АРМ Метролога» необходимо выполнение следующих условий:

1. Доступ к базе данных без участия программных компонентов «АРМ Метролога».

2. Автономное функционирование модуля договоров.

3. Прозрачный для пользователя доступ к модулю договоров из программы «АРМ Метролога»:

- автоматическая регистрация,
- возможность встраивания в проект.

4. Возможность дальнейшего расширения функциональности модуля.

5. Возможность использования отдельных служб или всего модуля для других проектов подразделения.

При проектировании модуля договоров было решено использовать сильное функциональное дробление сервисов, что обусловлено спецификой поставленной задачи. В частности, модуль договоров должен обеспечивать учет многих видов документов, каждый из которых имеет особую структуру и регистрируется в отдельной таблице базы данных. Соответственно каждый сервис реализует отдельное действие над отдельным документом.

Отдельные сервисы представляют собой реализацию таких функций, как выборка некоторой информации из базы данных по данным условиям, изменение или удаление отдельной записи и т. д.

Далее сервисы, относящиеся к работе с определенными данными, объединяются при помощи оркестрации в составные сервисы, снабженные удобным рабочим интерфейсом, выполненном в стиле всего проекта. Эти составные сервисы предоставляются для работы пользователями.

Рассмотрим особенности реализации приложения с использованием web-сервисов на примере одного из простейших составных сервисов конечного приложения – сервиса работы с поставками (см. рис.).

1. *Сервис добавления документа в базу данных* является одним из общих сервисов модуля и применяется

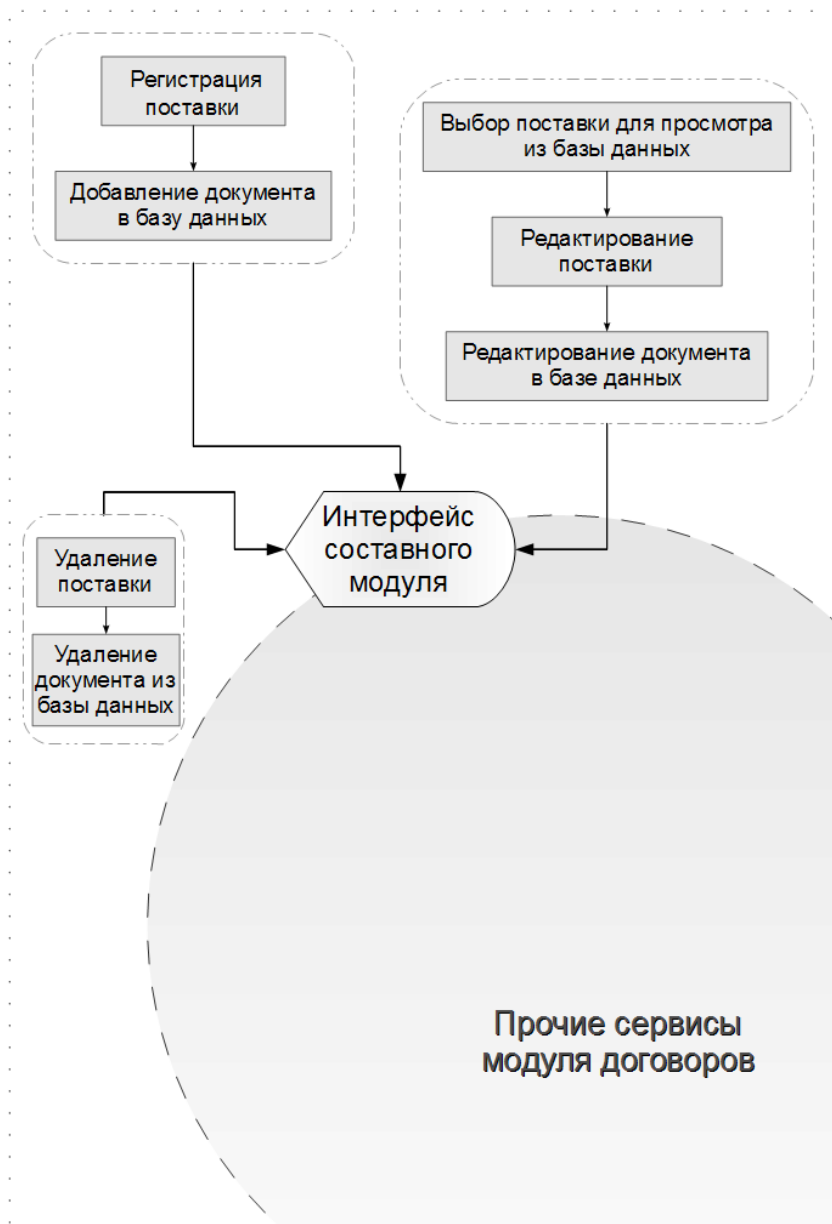


Рис. Модуль договоров

в нескольких составных сервисах. Он принимает данные о платежных документах, регистрирует документ в соответствующей таблице и возвращает вызывавшему сервису id зарегистрированной записи в базе данных.

2. *Сервис регистрации поставки* принимает данные, введенные пользователем, обрабатывает и проверяет их на правильность ввода и регистрирует в базе данных, используя сервис добавления документа.

3. *Сервис выбора поставки для просмотра* выбирает из базы данных сведения об одной из поставок по id и выводит их пользователю для просмотра и редактирования.

4. *Сервис редактирования документа в базе данных* является одним из общих сервисов модуля и применяется в нескольких составных сервисах. Он

позволяет редактировать данные о соответствующем платежном документе по id записи.

5. *Сервис редактирования поставки* позволяет пользователю вносить изменения в данные выбранной с помощью сервиса выбора поставки. При редактировании также применяется сервис редактирования документа.

6. *Сервис удаления документа из базы данных* является одним из общих сервисов модуля и применяется в нескольких составных сервисах. Он удаляет из базы данных запись о платежном документе по id записи.

*Сервис удаления поставки* позволяет удалить из базы данных сведения о поставке и связанных с ней платежных документах. Использует сервис удаления документа из базы данных.

Для удобства работы с данными о поставках вышеперечисленные сервисы сведены в единый интерфейс, соответствующий интерфейсу всего проекта. При этом сервисы скрыты от пользователя, но при необходимости доступны разработчикам.

Пользователь видит перед собой только web-страницу, содержащую необходимую ему информацию и элементы управления, он может просматривать и редактировать информацию по своему усмотрению.

Комплекс программ функционирования создан в виде традиционного web-приложения, тогда как модуль договоров создан на основе сервис-ориентированного программирования, однако для пользователя разница не видна. Это происходит потому, что интерфейс модуля обеспечивает только представление в удобном виде полученных при помощи сервисов данных, соответственно это представление может быть любым.

Основным преимуществом подобного решения является то, что пользовательский интерфейс отделен от внутренней логики программы, поэтому при любых изменениях, например, структуры базы данных, нужно будет переписать только сервисы, не затрагивая интерфейс ПО.

Кроме того, однотипные сервисы (такие как сервисы добавления, редактирования и удаления документов) создаются один раз и затем применяются во всем модуле, что сокращает время разработки. К подобным сервисам можно обращаться как из других сервисов, так и непосредственно из пользовательского интерфейса, если возникнет такая необходимость.

В настоящее время общепринятым стандартом для обмена данными с web-сервисами является использование сообщений, основанных на XML. XML позволяет передавать информацию в упорядоченном виде, создавая сложные структуры данных, поддающиеся автоматическому разбору. Гибкость этого языка обеспечивает возможность его применения в любых программах.

В модуле договоров для обмена данными также применяется XML. Сервисы определяют формат получаемых и передаваемых данных, эта информация

доступна разработчикам в описании сервисов, и они могут оперировать получаемой от сервисов и передаваемой сервисам информацией, чтобы представить ее в наиболее удобном для пользователя виде.

Использование XML для обмена сообщениями позволяет представить каждый сервис в форме «черного ящика», т.е. как объект, реагирующий определенным образом на определенное внешнее воздействие. Не нужно знать ничего ни о языке, на котором написан сервис, ни о платформе, на которой он располагается. Это позволяет при необходимости легко заменять сервисы или использовать их в других проектах, поскольку важно лишь сохранить формат сообщений.

Таким образом, использование технологии SOA позволило разработать программный модуль, удовлетворяющий всем выдвинутым условиям:

а) реализовать доступ к базе данных в качестве отдельной службы;

б) создать модуль договоров как автономную составную службу;

в) включить в комплекс ПО «АРМ Метролога» компонент, обеспечивающий доступ к модулю договоров и преобразующий ответные сообщения в единый для «АРМ Метролога» внешний вид;

г) функциональность модуля при необходимости может быть расширена с помощью добавления новых служб;

д) отдельные службы модуля или модуль целиком могут быть встроены в любую систему, взаимодействующую на базе интернет-протокола.

## Литература

1. Архитектура SOA как она есть. Л. Маквитти. – Сети и системы связи ([www.ccc.ru](http://www.ccc.ru)).
2. Реализация бизнес-процессов в SOA. Д. Фейгин. – Открытые системы ([www.osp.ru](http://www.osp.ru)).
3. Моделирование SOA. – СМ-Консалт ([cmcons.com](http://cmcons.com)).

# ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ В РАМКАХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «НАГНЕТАТЕЛЬ» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

*К. И. Дикарев, С. В. Фотин, С. Ф. Перетрухин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

При обеспечении контрактных обязательств по поставке природного газа потребителям ОАО «Газпром» расходует только на транспортирование газа свыше 15 % от всего добываемого его количества. Поэтому задача оптимальной транспортировки газа через компрессорные цеха (КЦ) и компрессорные станции (КС) является крайне важной и актуальной.

В НПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» осуществляется разработка и реализация диалоговых программных средств оптимизации работы типовой КС в стационарном режиме, которая выполняется совместно со специалистами ННГУ им. Лобачевского. Это программное обеспечение (ПО) носит название «Нагнетатель».

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) используются на КС/КЦ для охлаждения нагревающегося при компримировании (сжатии) транспортируемого газа, что обеспечивает прочность и устойчивость подземных трубных ниток, сохранность окружающей среды, облегчает перекачку газа и интенсифицирует работу трубопроводной системы.

В настоящее время в рамках ПО «Нагнетатель» используется существенно упрощенная модель работы установок АВО газа. С другой стороны, при моделировании режимов работы КС необходимо адекватно определять параметры охлаждаемого газа, так как температурный режим оказывает существенное влияние на оптимальные газодинамические режимы работы КС.

Кроме того, при достаточно низких температурах окружающей атмосферы допускается эксплуатация АВО в режимах свободной конвекции, то есть при отключенных воздушных вентиляторах, при условии обеспечения требуемой температуры на выходе КС. Таким образом, возникает задача, по своей важности не уступающая проблеме оптимизации расхода энергоресурсов на транспортирование газа. Это задача оптимизации числа работающих вентиляторов АВО по критерию наименьших затрат электроэнергии, с условием сохранения заданного температурного режима станции.

Ввиду вышеизложенного актуальной становится задача выбора подходящей модели работы установок АВО для решения вышеуказанных задач.

В научно-технической литературе [1-4] опубликовано достаточно много методик и алгоритмов расчета режимов АВО. Однако большинство из них не адаптировано для реализации в рамках разрабатываемого программного обеспечения. В частности среди существенных недостатков данных методик можно отметить непригодность их для расчета режимов свободной конвекции с трубной поверхности АВО.

Целью выполненной работы являлось осуществление выбора из нескольких методик расчета АВО наиболее подходящей в качестве базовой, для моделирования их режима работы, адаптировать и интегрировать методику в разрабатываемое ПО «Нагнетатель».

В работе рассмотрены три методики моделирования режимов работы АВО, проанализированы их преимущества и недостатки. Представлены решения по алгоритмической реализации этих методик с целью практического применения, а также по расширению их возможностей. Для всех методик выполнено сравнение расчетных температур потока газа на выходе АВО.

По результатам выполненных исследований выявлено, что наиболее подходящей для дальнейшей практической реализации является методика моделирования АВО, основанная на уравнении Шухова.

Авторы выражают благодарность следующим сотрудникам кафедры ИАНИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского: М. Х. Прилуцкому, Н. В. Старостину, Л. Г. Афраймовичу, А. В. Филимонову.

## Принцип работы АВО

По принципу работы АВО представляют собой рекуперативные теплообменники, состоящие из 2-х основных частей: поверхности охлаждения и системы подачи воздуха, включая приводы вентиляторов. Охлаждаемым теплоносителем является сжатый до высокого давления природный газ, движущийся внутри трубок малого диаметра. Данные трубки имеют внешнее оребрение с целью интенсификации теплообмена и обтекаются охлаждающим теплоносителем, в качестве которого выступает нагнетаемый



вентиляторами атмосферный воздух. Оребренные трубки аппарата обычно разделены на несколько групп, называемых секциями.

Каждый АВО, в зависимости от типа, может иметь от 1-го до 6-ти вентиляторов.

На КС аппараты воздушного охлаждения обычно объединяются в станции, в рамках которых несколько соединенных параллельно аппаратов АВО образуют блок.

### Постановка задачи и математическая модель АВО

Задача определения теплового режима АВО формулируется следующим образом: при известных газодинамических параметрах и температуре природного газа на входе АВО, а также заданных управляющих воздействиях, определить температуру природного газа на выходе из АВО.

При рассмотрении подобной задачи следует иметь в виду, что тепловой режим АВО тесно связан с его газодинамическим режимом. Это обуславливает зависимость расхода газа через каждый АВО от средней температуры внутри аппарата, которая, в свою очередь, зависит от расхода. Таким образом, задача становится нелинейной.

В основе математической модели АВО лежит уравнение теплового баланса [5]

$$\begin{aligned} Q\rho_c C_p (T_{in} - T_{охл})\eta &= \\ = Q_{air}\rho_c^{air} C_p^{air} (t_{air}^{out} - t_{air}^{in}) &= \\ = K(\alpha_1, \alpha_2, S, \delta/\lambda) S \varepsilon_{\Delta T} \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln(\Theta_1/\Theta_2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход природного газа при стандартных условиях, ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $Q_{air}$  – объемный расход воздуха при стандартных условиях, определяемый режимом вентиляторов, ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $\rho_c$  – плотность природного газа при стандартных условиях, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $\rho_c^{air}$  – плотность воздуха при стандартных условиях, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $C_p = C_p(T)$  – изобарная теплоемкость природного газа, ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $C_p^{air} = C_p^{air}(t_{air})$  – изобарная теплоемкость атмосферного воздуха, ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $T_{in}$ ,  $T_{охл}$  – температуры природного газа на входе и выходе АВО, (К);  $t_{air}^{in}$ ,  $t_{air}^{out}$  – температуры воздуха на входе и выходе АВО, (К);  $\eta$  – коэффициент тепловых потерь, принимается  $\eta \approx 0,98 \dots 0,99$ ;  $K$  – коэффициент теплопередачи АВО, ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ );  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны природного газа и воздуха соответственно, ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ );  $\delta/\lambda$  – эквивалентное термическое сопротивление трубок,

( $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ );  $S$  – поверхность теплопередачи, ( $\text{м}^2$ );  $\varepsilon_{\Delta T}$  – поправочный коэффициент, учитывающий перекрестных ход теплоносителей;  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – температурные напоры на входе и выходе АВО, (К).

Для вычисления коэффициента теплоотдачи от газа к внутренним стенкам трубок обычно используется следующая зависимость:

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda_g}{d_{вн}} Re_g^{0,8} Pr_g^{0,4}, \quad (2)$$

где  $\lambda_g$  – теплопроводность газа, ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $d_{вн}$  – внутренний диаметр трубок, м;  $Re_g$  – критерий Рейнольдса движения газа внутри трубок АВО;  $Pr_g$  – критерий Прандтля движения газа внутри трубок АВО.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи от оребренной поверхности трубок к воздуху используется множество различных зависимостей [5-8]. Одной из наиболее характерных и удобных для программной реализации является следующая:

$$\alpha_2 = 0,223ku^{0,33}h^{0,14}d_n^{-0,54} \left( \frac{W_{air}\rho_{air}}{\mu_{air}} \right)^{0,65}, \quad (3)$$

где  $k$  – поправка на оребрение;  $h$  – высота ребер на трубках АВО, (м);  $u$  – шаг между ребрами, (м);  $W_{air}$  – скорость охлаждающего воздушного потока, (м/с);  $d_n$  – наружный диаметр трубок у основания ребер, м;  $\mu_{air}$  – динамическая вязкость воздуха, (Па·с).

Видно, что зависимость (3) может быть использована только при работающих вентиляторах ( $W_{air} \neq 0$ ). Зануление скорости воздушного потока от вентилятора, которое предлагается, например, в [5], приведет к равенству нулю коэффициента теплоотдачи, что противоречит законам теплообмена.

При режиме свободной конвекции для вычисления коэффициента теплоотдачи в научнотехнической литературе зависимости практически отсутствуют. Использовалась следующая зависимость [8], справедливая для горизонтальной одиночной оребренной трубки:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = 20,5 \frac{\lambda_{air}}{d_n} \left( \frac{\beta g d_n^3}{\nu_{air}^2} (\bar{t} - t_{air}) 10^{-6} \right)^{0,384} \times \\ \times \left( \frac{u}{d_n} \right)^{0,384} \left( \frac{h}{d_n} \right)^{-0,194}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda_{air}$  – теплопроводность воздуха, ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха, ( $1/\text{К}$ );  $t_{air}$  – средняя температура окружающего воздуха, (К);  $\bar{t}$  – средняя температура поверхности оребренной трубы, (К);  $\nu_{air}$  – кинематическая вязкость воздуха, ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

## Анализ модели по методике ВНИИГАЗ

Данная методика расчета теплового режима АВО, предложенная ВНИИГАЗ [3], основывается на анализе нелинейного уравнения теплового баланса посредством уточняющих итераций для выходной температуры газа, заданной вначале приближенно. В ее рамках выполняется проверочный анализ соответствия требуемой расчетной мощности одного вентилятора характеристикам реального вентилятора АВО. Для оценки расчетной мощности, требуемой от вентилятора, определяется значение создаваемого им статического давления.

Укрупненная блок-схема алгоритма анализа теплового режима АВО представлена на рис.1. Следует отметить следующие недостатки методики ВНИИГАЗ: отсутствие учета режима свободной конвекции, появление закливаний и делений на ноль при близких значениях температур газа на входе и атмосферного воздуха.

В рамках данной методики средняя температура воздуха в секции АВО вычисляется через ненулевой напор вентиляторов, поэтому использование зависимости (4) для режима свободной конвекции оказалось невозможным.

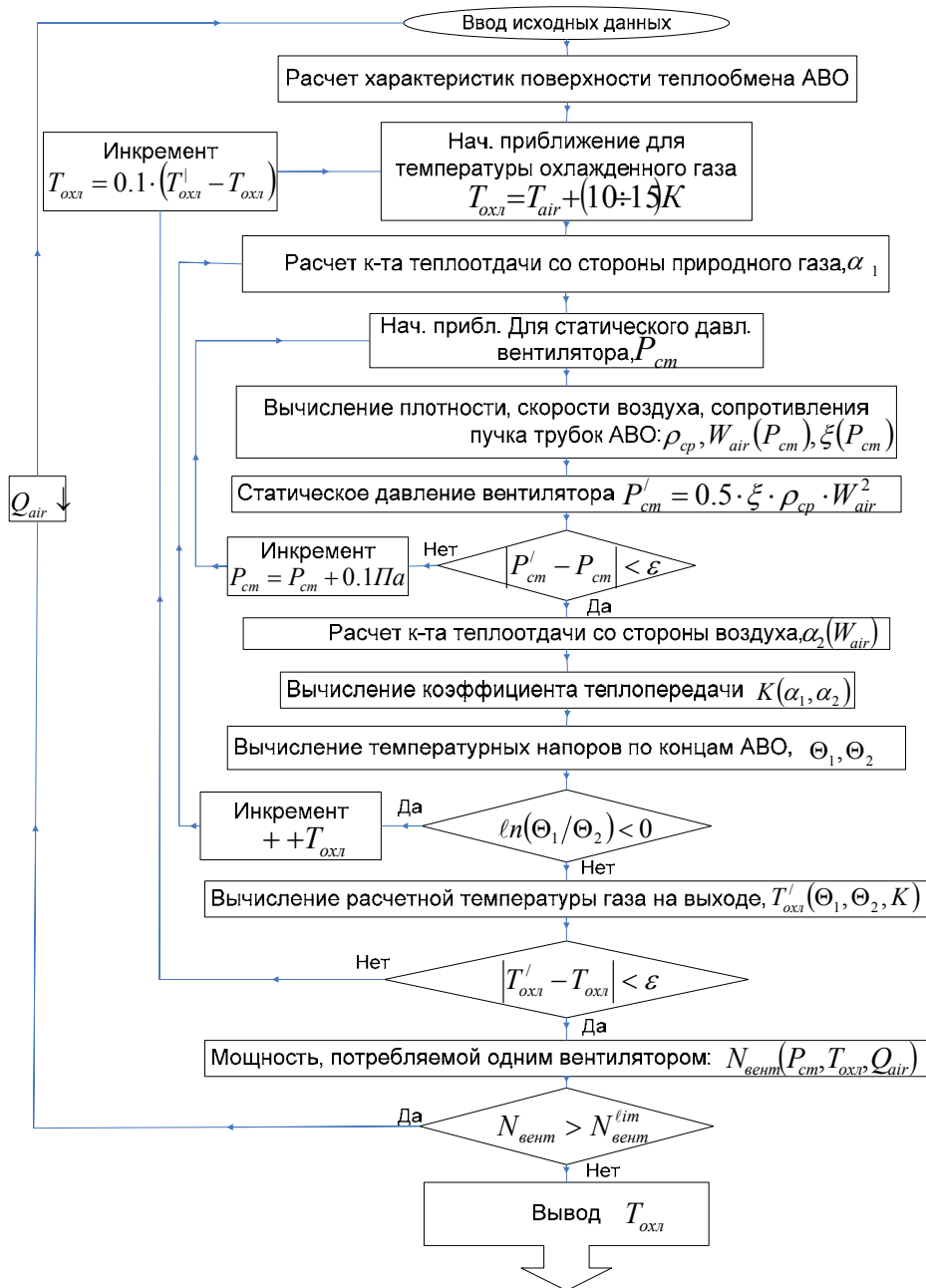


Рис. 1. Диаграмма алгоритма анализа теплового режима АВО на основе методики ВНИИГАЗ

В предлагаемый в рамках методики ВНИИГАЗ подход к оценке статического давления вентилятора был скорректирован в процессе программной реализации. Коррекция касалась выбора начального приближения для статического давления. Взамен «ручного» выбора приемлемого начального значения для статического давления данного типа вентиляторов и последующего выполнения одной или двух корректирующих итераций (до удовлетворительной точности) предложено полагать начальное приближение равным  $10Pa$  и выполнять необходимое число корректировок. Такой подход позволил полностью автоматизировать данный блок оценки статического давления вентилятора.

### Анализ модели при помощи уравнения Шухова

Уравнение Шухова имеет широкое применение при определении тепловых режимов работы различного технологического оборудования в нефтегазовой отрасли. В частности оно может быть применено к для расчета температуры охлаждения природного газа в АВО [9, 10]. Уравнение Шухова используется для анализа режима работы АВО в следующем виде:

$$T_{\text{охл}} = t_{\text{air}} + (T_{\text{in}} - t_{\text{air}}) \exp\left(-\frac{\pi K(T_{\text{in}}, T_{\text{охл}}, t_{\text{air}}) S}{\rho_c Q C_p (T_{\text{in}}, T_{\text{охл}})}\right). \quad (5)$$

Следует отметить, что уравнение Шухова (5) является, по сути, уравнением теплового баланса (1) в условиях неизменности температуры окружающего воздуха  $t_{\text{air}}$ .

В рамках предлагаемого алгоритма анализа теплового режима АВО уравнение Шухова решается методом Ньютона, где производная по температуре заменена конечной разностью.

Алгоритм позволяет использовать для оценки температуры газа за АВО зависимости для коэффициента теплоотдачи, как при работающих вентиляторах, так и при свободной конвекции.

Для расчета теплового режима АВО в ПО «Нагнетатель» при отключенных вентиляторах потребовалось организовать итерационный процесс последовательных приближений, в котором вычисление средней температуры поверхности трубок, а также непосредственное решение уравнения (5) оформлены в виде отдельных подпрограмм. Укрупненная блок-схема алгоритма моделирования работы АВО в режиме свободной конвекции приведена на рис. 2.

Данный алгоритм достаточно прост в реализации, работает в широком диапазоне температур газа и воздуха. К недостаткам его следует отнести некоторое занижение выходной температуры охлаждаемого газа, так как предполагается, что охлаждающий поток воздуха имеет неизменную температуру, то есть является теплоемким.

Эта методика [11, 12] отличается тем, что при анализе теплового режима станции АВО каждый входящий в нее аппарат не рассматривается отдельно, а анализируется работа всех АВО в совокупности. При этом предполагается, что расход природного газа равномерно распределяется между всеми аппаратами, что является истиной только при совпадении их геометрических и физических особенностей и при одинаковом режиме их работы. При разных количествах работающих вентиляторов на каждом АВО изменение теплового режима ведет за собой изменение гидравлического режима и наоборот. Таким образом, данную особенность методики следует отнести к недостаткам.

Посредством введения эмпирических коэффициентов эффективности работы АВО в зависимости от числа включенных на нем вентиляторов авторы методики предлагают эффективный итерационный алгоритм, позволяющий определить температуру природного газа на выходе станции АВО. Недостатком такого подхода является также то, что данные коэффициенты могут отличаться в различных условиях работы АВО, отличающихся от тех, в которых они определялись экспериментально.

В оригинальном описании [11] данная методика использует постоянные значения [коэффициента теплопередачи аппарата и значения теплофизических свойств газов, тогда как в реальности они зависят от температур теплоносителей и других параметров. При программной реализации данной методики данный недостаток был устранен. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

### Расчет числа вентиляторов

Данная задача состоит в расчете минимального количества вентиляторов, которые должны быть включены, чтобы температура газа за АВО не превышала заданного значения  $T_{\text{уст}}$ . Эта задача может быть решена с привлечением расчетных процедур, рассмотренных выше [5].

Проводим расчет  $T_{\text{охл}}$  газа за станцией АВО при отключении всех вентиляторов аппаратов (приоритетный режим) и проверяем условие  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$ . Если оно выполняется, то задача решена. Иначе, проводим расчет  $T_{\text{охл}}$  при включении одного вентилятора в каждом АВО и снова проверяем условие  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$ . При его выполнении последовательно отключаем вентиляторы на АВО, выполняем для каждого варианта расчет  $T_{\text{охл}}$  и проверку условия  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$  до нахождения критического числа вентиляторов. Если же по одному работающему вентилятору на каждом АВО оказывается недостаточно

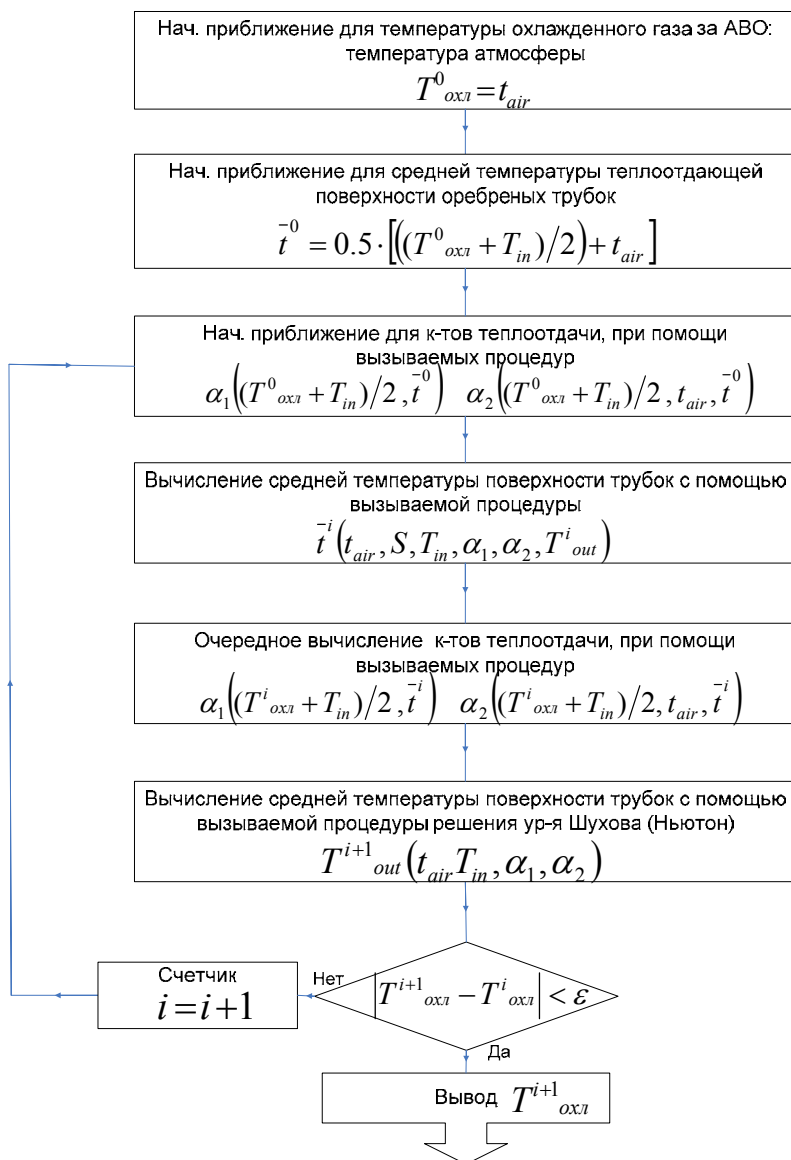


Рис. 2. Диаграмма алгоритма анализа АВО в режиме свободной конвекции на основе методики, использующей уравнение Шухова

для обеспечения  $T_{охл} \leq T_{уст}$ , то включаем по два вентилятора в каждом аппарате и выполняем процедуру снова.

### Пример расчета

Приведем пример расчета с помощью представленных выше моделей режима работы конкретного АВО типа 2АВГ75 [3, 11]. Три приведенные методики моделирования режимов работы АВО были реализованы согласно описанным алгоритмам на языке высокого уровня С++ и в среде пакета MathCad.

Ниже, в табл. 1–3, приведены результаты расчета температуры природного газа за АВО с использованием представленных выше методик. При этом в

табл. 1 представлены результаты расчетов режима работы с двумя вентиляторами, в табл. 2 – с одним вентилятором, а в табл. 3 – в режиме свободной конвекции (отключение вентиляторов).

Из представленных результатов видно, что алгоритмы, основанные на всех трех методиках расчета, дают сходные результаты. Различия между ними не превышают 17% для всех режимов работы. Несколько заниженные результаты выходных температур газа, получаемые при помощи методики уравнения Шухова, связаны с допущением о неизменности температуры воздушного потока в процессе теплообмена внутри секций аппарата.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Приведенные выше алгоритмы численного моделирования работы АВО, основанные на методиках ВНИИГАЗа, ТюмГНГУ и уравнении Шухова могут быть применены для внедрения

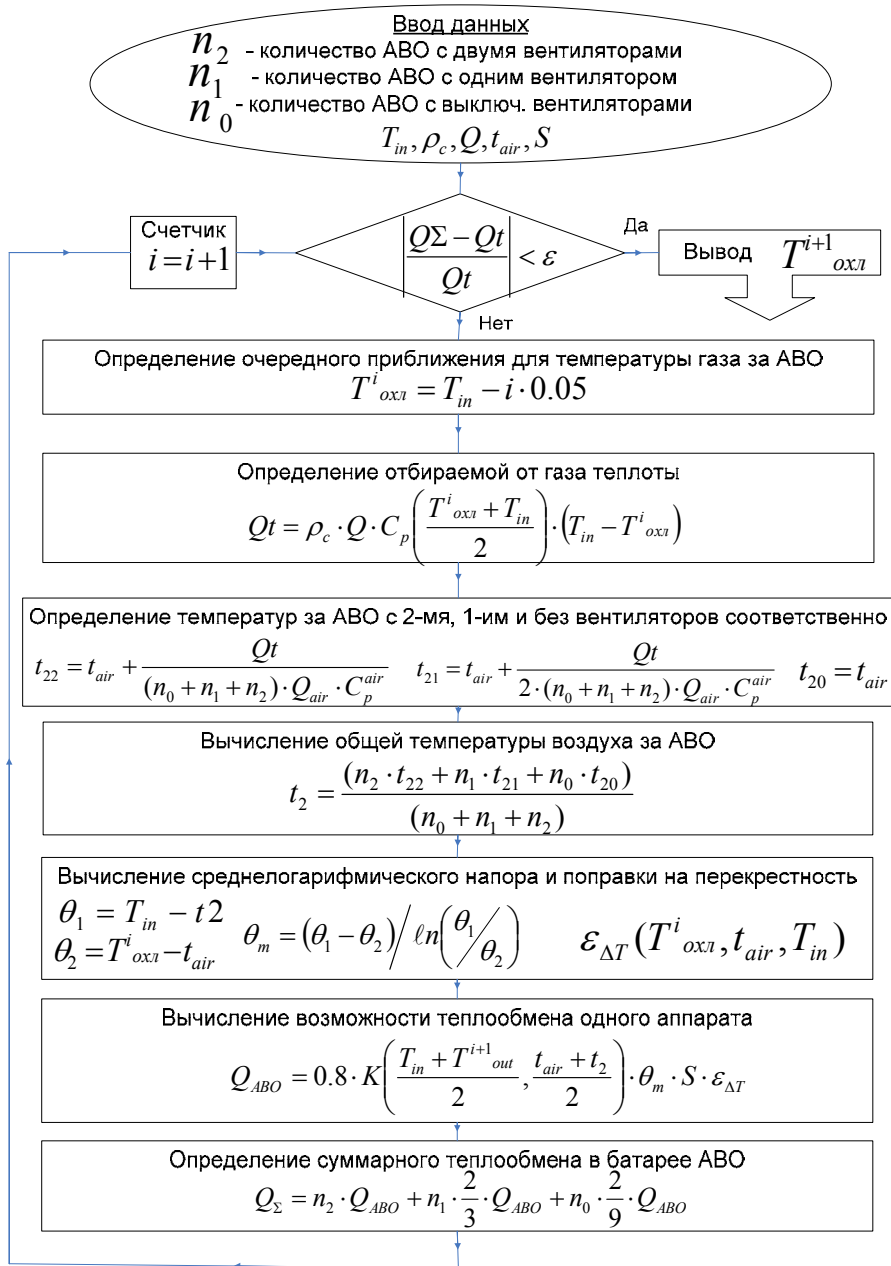


Рис. 3. Диаграмма алгоритма анализа теплового режима АВО на основе методики ТюмГНГУ

Таблица 1

Расчет теплового режима АВО при двух работающих вентиляторах

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	26,8	28,1	25,3

Таблица 2

Расчет теплового режима АВО при одном работающем вентиляторе

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	23,4	21,5	19,2

Таблица 3

Расчет теплового режима АВО при отключенных вентиляторах

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	–	37,2	38,7

в рамках программного обеспечения оптимизации работы КЦ/КС. Алгоритм, основанный на анализе уравнения Шухова, видится наиболее подходящим для внедрения благодаря его относительной простоте, надежности, скорости, возможности индивидуального расчета каждого аппарата на станции АВО при всех режимах работы вентиляторов, включая свободную конвекцию.

## Литература

1. Крюков Н. П., Аппараты воздушного охлаждения. М.: Химия. 1983.
2. Бахмат Г. В., Еремин Н. В., Степанов О. А. Аппараты воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях. С-Пб.: Недра, 1994.
3. Машины и оборудование газонефтепроводов: Учебн. пособие для вузов / Ф. М. Мустафин, Н. И. Коновалов, Р. Ф. Гильметдинов и др. 2-е изд., перераб. и доп. Уфа: Монография, 2002.
4. Камалетдинов И. М., Абузова Ф. Ф. Коэффициенты теплопередачи аппаратов воздушного охла-

ждения (АВО) газовой промышленности // Проблемы энергетики № 3–4, 2002. С. 20–23.

5. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005.

6. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.

7. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1982.

8. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш и др.; Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. С-Пб.: Недра, 1996.

9. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / Под ред. В. Е. Селезнева. М.: МАКС Пресс, 2007.

10. Грачев В. В., Щербаков С. Г., Яковлев Е. И. Динамика трубопроводных систем. М.: Наука, 1987.

11. Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности: Учебное пособие / Под ред. Ю. Д. Земенкова. М.: «Инфра-Инженерия», 2008. Т. 1, 2.

# СЕРВИСНАЯ ПОДСИСТЕМА УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПАКТНОЙ СУПЕР-ЭВМ

*Н. А. Дмитриев, В. Н. Лашманов, В. Н. Стрюков, А. В. Шатохин, Е. Л. Шмаков, С. О. Черных*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Развитие различных областей науки и промышленности во многом определяется использованием и степенью совершенства вычислительной техники. Создание полноценных высокопроизводительных вычислительных систем (кластеров) – процесс трудоемкий и требующий значительных капиталовложений. В этой связи все большую популярность набирает направление компактных суперЭВМ – персональных супер-компьютеров (PSC, настольные суперЭВМ и т. д.), не требующих для эксплуатации специализированных инженерных систем и сооружений. Такие вычислительные машины ориентированы на использование в научно-исследовательских институтах, исследовательских лабораториях на производстве, в автомобильной, авиационной, аэрокосмической отраслях, атомной энергетике и коммерческих проектах. Компактные суперЭВМ позиционируются не только в качестве замены традиционных кластеров высокой производительности, но и как дополнение к ним. К этому классу вычислительных машин относится разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ универсальная компактная суперЭВМ (далее КС-ЭВМ).

КС-ЭВМ оснащена базовым системным и прикладным программным обеспечением (в том числе и разработанным в РФЯЦ-ВНИИЭФ), ориентированным на решение конкретных задач 3-х мерного имитационного моделирования. Целевая аудитория – выделенные вычислительные центры и ведущие отраслевые предприятия РФ. Пиковая производительность КС-ЭВМ, составляющая 1.1 Тфлопс, достигается за счет использования трех вычислительных модулей (материнских плат), имеющих в своем составе по четыре универсальных процессора Magny-Cours и 32 модуля памяти. С аппаратной точки зрения КС-ЭВМ является комплексным оборудованием и состоит из ряда подсистем:

- вычислительной подсистемы;
- дисковой подсистемы;
- подсистемы энергообеспечения;
- подсистемы охлаждения;
- сервисной подсистемы.

## Вычислительная подсистема

Вычислительная подсистема КС-ЭВМ – это три вычислительных модуля, объединенных с использованием канала InfiniBand. Соединение осуществляется по бескоммутаторной схеме «треугольник» с использованием двухпортовых адаптеров QDR InfiniBand как показано на рис. 1.

## Дисковая подсистема

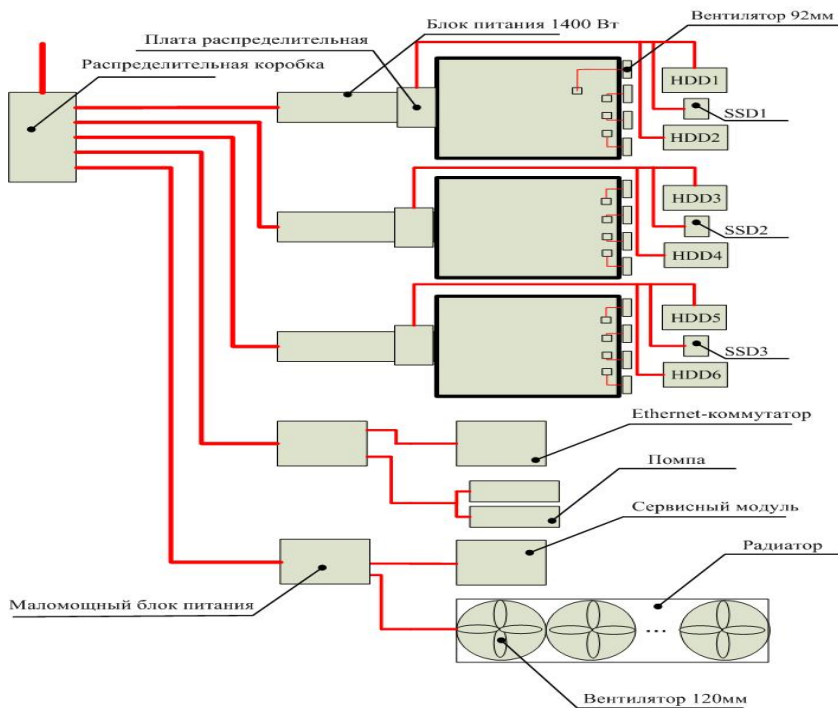
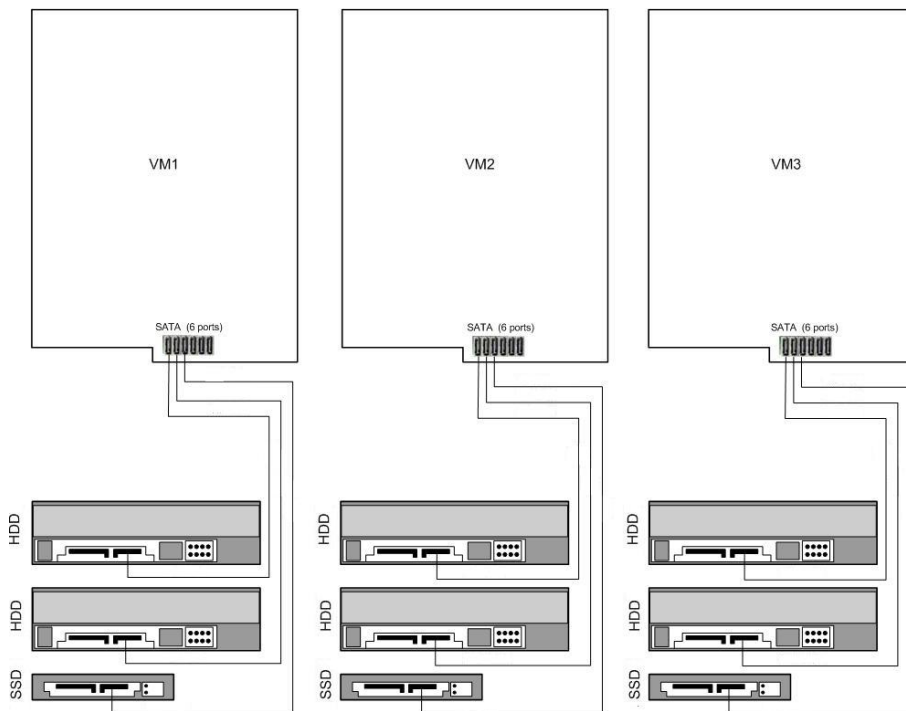
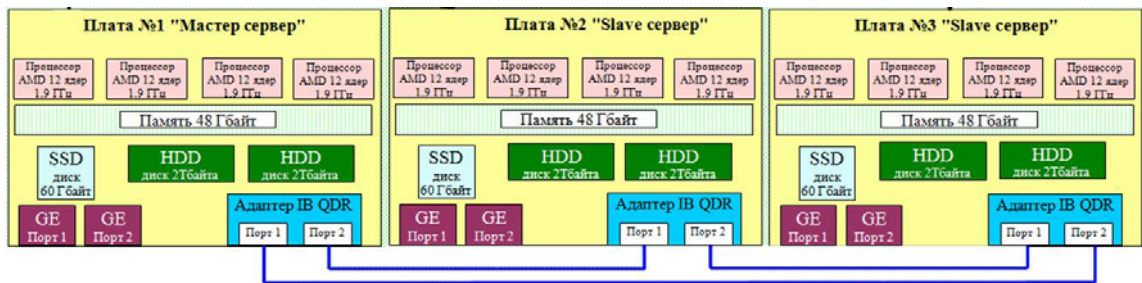
Дисковая подсистема КС-ЭВМ состоит из шести SATA-II дисков (по два диска на каждый модуль) и трех SSD-дисков (по одному на каждый модуль), как показано на рис. 2.

SATA-диски каждого вычислительного модуля объединены в RAID-массив (RAID-1) с целью повышения надежности и предназначены для хранения данных, SSD-диски хранят метаданные. Диски вычислительных модулей взаимодействуют посредством канала InfiniBand и образуют кластерную параллельную файловую систему Lustre.

## Подсистема энергообеспечения

Подсистема энергообеспечения КС-ЭВМ (рис. 3) построена на принципе отдельной и комбинированной подачи питания на энергопотребляющие компоненты. Питание вычислительных модулей построено на базе трех блоков питания с отдельной подачей питания на каждый модуль. В КС-ЭВМ предусмотрено два дополнительных маломощных блока питания для питания водяных помп (в системе жидкостного охлаждения), ethernet-коммутатора, сервисного модуля и 120-мм вентиляторов. Вся система подключается к энергосети посредством одной вилки стандарта 220V, суммарная мощность не превышает 2,5 кВт.





## Подсистема охлаждения

Подсистема охлаждения КС-ЭВМ (рис. 4) является комбинированной жидкостно-воздушной системой. Система жидкостного охлаждения (далее СЖО) представляет собой совокупность элементов, образующих замкнутый контур, в котором циркулирует жидкость, отводящая тепло от процессоров. Воздушная система охлаждения используется для защиты от перегрева блоков питания, компонентов материнских плат, жестких дисков и для охлаждения жидкости, проходящей через радиаторы СЖО. Воздушная система охлаждения блоков питания построена на вентиляторах и является штатной для блоков питания и встроена непосредственно в корпус блоков питания.

## Сервисная подсистема

Контроль показателей работоспособности подсистем КС-ЭВМ возложен на сервисную подсистему (рис. 5), являющуюся, по сути, аппаратно-программным комплексом. Аппаратная часть представлена вычислительными модулями, объединенными сетью Ethernet с сервисной платой (сервисный модуль). Каждый вычислительный модуль имеет в своем составе плату ВМС для опроса аппаратных датчиков, характеризующих основные показатели состояния системы, такие, как температура, напряжения на энергопотребляющих компонентах, скорости вращения вентиляторов и т. д. Опрос осуществляется с определенной периодичностью, задаваемой программно.

Вычислительные модули имеют следующий список групп опрашиваемых сенсоров:

- температурные сенсоры температуры процессоров и чипсетов;
- подсистема питания – номиналы напряжений на компонентах;
- скорости вращения вентиляторов;
- состояние питания – статус, имеющий три значения (включено, выключено, отключено от питающей сети).

Сервисный модуль является компактной материнской платой VIA EPIA-N700-15L (форм-фактор NanoITX), оснащенной процессором с тактовой частотой 1.5 ГГц и 2 Гбайт DDR2 оперативной памяти, и предназначен для запуска и выполнения системы мониторинга. GE-порты (Gigabit Ethernet) сервисного и вычислительных модулей соединены с соответствующими портами Ethernet-коммутатора (switch), образуя сервисную сеть.

Программная составляющая сервисной подсистемы включает в себя системное ПО и систему управления и мониторинга (рис. 6). Система мониторинга предназначена для работы под управлением операционной системы Linux и представляет собой скриптовую оболочку для утилиты ipmitool. Это означает, что в основе функционирования системы лежит использование указанной утилиты для выполнения IPMI-опросов вычислительных узлов с последующей обработкой результатов опроса. Скриптовый язык, используемый в данной системе, – Perl (CGI).

На рис. 6 представлены основные функциональные блоки системы мониторинга. Центральным управляющим элементом системы является система сбора и обработки информации. В ее функции входит управление утилитой ipmitool и обработкой результатов опроса. Опрос плат ВМС вычислительных модулей осуществляется по протоколу IPMI.

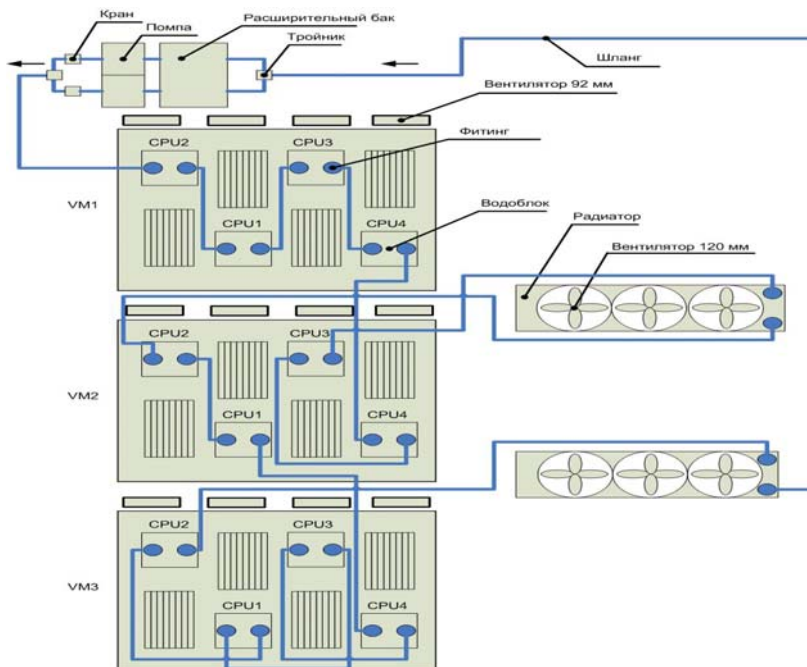


Рис. 4. Подсистема охлаждения КС-ЭВМ

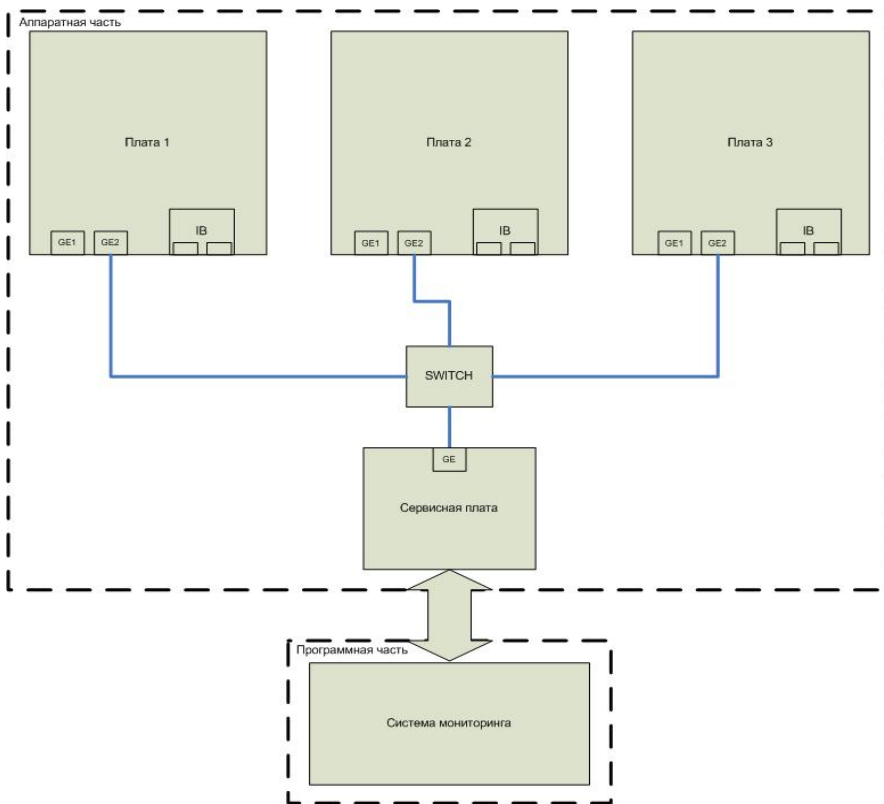


Рис. 5. Сервисная подсистема КС-ЭВМ

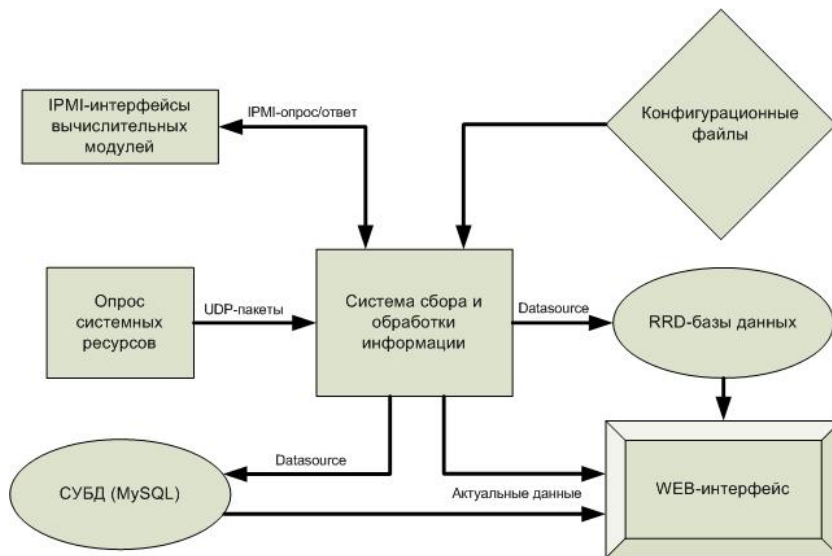


Рис. 6. Функциональная схема системы мониторинга

Данные, получаемые в результате опроса, фиксируются в СУБД (статистические данные), и предоставляется доступ к ним средствами WEB-интерфейса пользователя (актуальные данные). Конфигурационные файлы содержат необходимую для работы системы информацию: данные о подключении к СУБД и конфигурационные данные контролируемых устройств. При старте система сбора и обработки осуществляет чтение конфигурационных файлов, подключение к СУБД, в зависимости от заданных периодичностей опроса устройств выполняет балансировку нагрузки, после чего переходит

к процессу периодического опроса. RRD базы данных используются для накопления статистических сведений о показаниях датчиков за определенный промежуток времени. Исходные данные для формирования баз RRD предоставляются системой сбора и обработки. Кроме того, система мониторинга предусматривает возможность получения сведений о степени загруженности оборудования КС-ЭВМ. Эти функции возложены на модуль опроса системных ресурсов, который по протоколу UDP передает результаты опроса системе сбора и обработки информации.

WEB-страница системы мониторинга КС-ЭВМ спроектирована с учетом особенностей оборудования и имеет удобный, интуитивно понятный интерфейс. В функции WEB-интерфейса входит предоставление возможности:

- оперативного анализа состояния оборудования КС-ЭВМ;
- статистического анализа значений контролируемых сенсоров и полученных сообщений оборудования;
- управление питанием.

Карта WEB-интерфейса системы мониторинга представлена на рис. 7.

Далее будут рассмотрены разделы WEB-интерфейса и особенности их использования.

На рис. 8 представлено изображение главного окна WEB-интерфейса системы мониторинга КС-ЭВМ. Как видно из рисунка, окно состоит из трех основных областей: основного меню, заголовка, области данных.

Основное меню – это набор ссылок, предоставляющих доступ к основным разделам системы мониторинга. Механизм работы ссылок основан на обработке CGI-скриптов, определенным образом формирующих содержимое области данных.

Заголовок – статическая область, предназначенная для улучшения визуальных качеств интерфейса, реализованная с использованием изображения в формате .PNG.

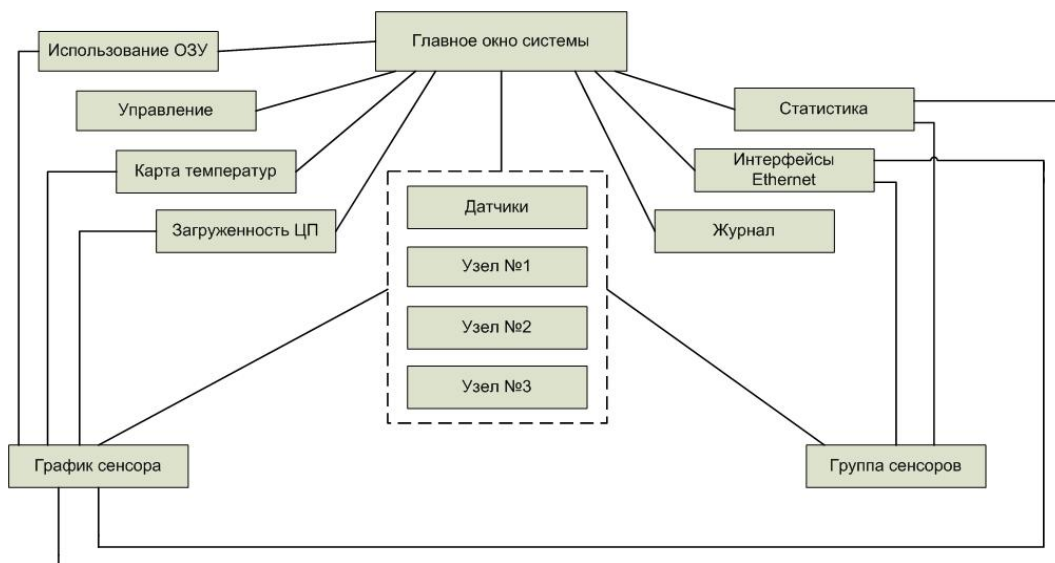


Рис. 7. Карта WEB-интерфейса системы мониторинга КС-ЭВМ

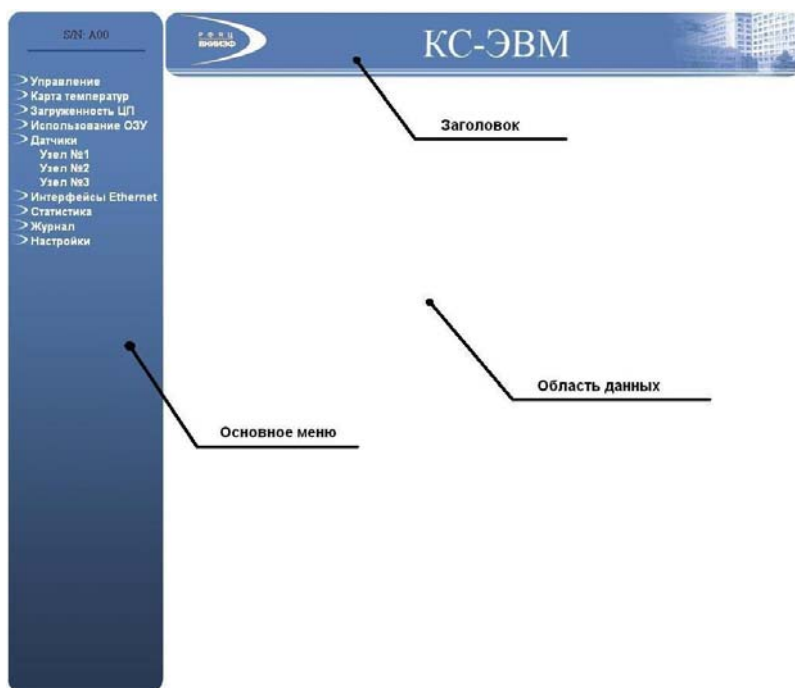


Рис. 8. Главное окно WEB-интерфейса системы мониторинга КС-ЭВМ

Область данных – динамически изменяющееся содержимое окна WEB-интерфейса. Вывод информации осуществляется в табличной форме.

В разделе «Управление» доступны базовые операции над питанием каждого вычислительного модуля и возможность просмотра статуса питания (рис. 9).

На рис. 10 представлена карта температур. Идея данного режима отображения информации заключается в том, чтобы предоставить пользователю удобную возможность визуальной оценки степени нагрева компонент КС-ЭВМ.

Карта загруженности центральных процессоров (рис. 11) построена по аналогии с температурной картой и предназначена для предоставления возможности оценки степени нагрузки на процессоры КС-ЭВМ.

Использование ОЗУ (рис. 12) – раздел системы мониторинг, построенный по принципу температурной

карты и предназначен для наблюдения за степенью загруженности оперативной памяти каждого вычислительного модуля КС-ЭВМ.

Датчики (рис. 13) – это раздел системы мониторинга, предоставляющий сведения об аппаратных сенсорах. Информация выводится в таблицу в четыре колонки: ссылка на график сенсора, наименование, показание, статус. Для удобства просмотра сенсоры сгруппированы по группам. Название группы является ссылкой, позволяющей в отдельном окне просматривать показания сенсоров только выбранной группы.

Разделы «Узел № 1», «Узел № 2», «Узел № 3» являются подразделами раздела «Датчики». Данные выводятся только по одному (выбранному) вычислительному модулю.



Рис. 9. Управление

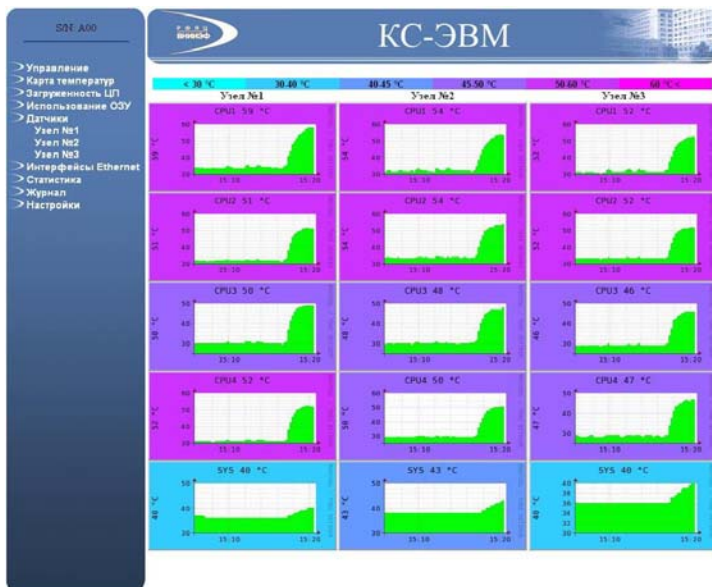


Рис. 10. Карта температур





Рис. 11. Загруженность ЦП



Рис. 12. Загруженность ОЗУ

Сетевой трафик и количество ошибок в Ethernet-сетях можно посмотреть в разделе «Интерфейсы Ethernet» (рис. 14).

Раздел статистики позволяет просматривать показания групп датчиков за определенный (выбираемый пользователем) промежуток времени в графическом виде (рис. 15).

Настройку сетевого интерфейса, а также имени пользователя и пароля предоставляет раздел системы мониторинга «Настройки» (рис. 16).

## Заключение

Поскольку КС-ЭВМ является уникальной разработкой, требующей использования специализированного оборудования и программного обеспечения, создание сервисной подсистемы позволило решить ряд задач, связанных с управлением и мониторингом ЭВМ такого класса. Накопленный опыт и наработки будут использованы для создания компактных вычислительных машин следующего поколения. Пла-

нируется расширение функциональных возможностей WEB-интерфейса. На данный момент сервисная подсистема в составе КС-ЭВМ сдана в опытную эксплуатацию, успешно функционирует, а также ис-

пользуется для тестирования и отладки небольших групп серверов и активно модернизируется.

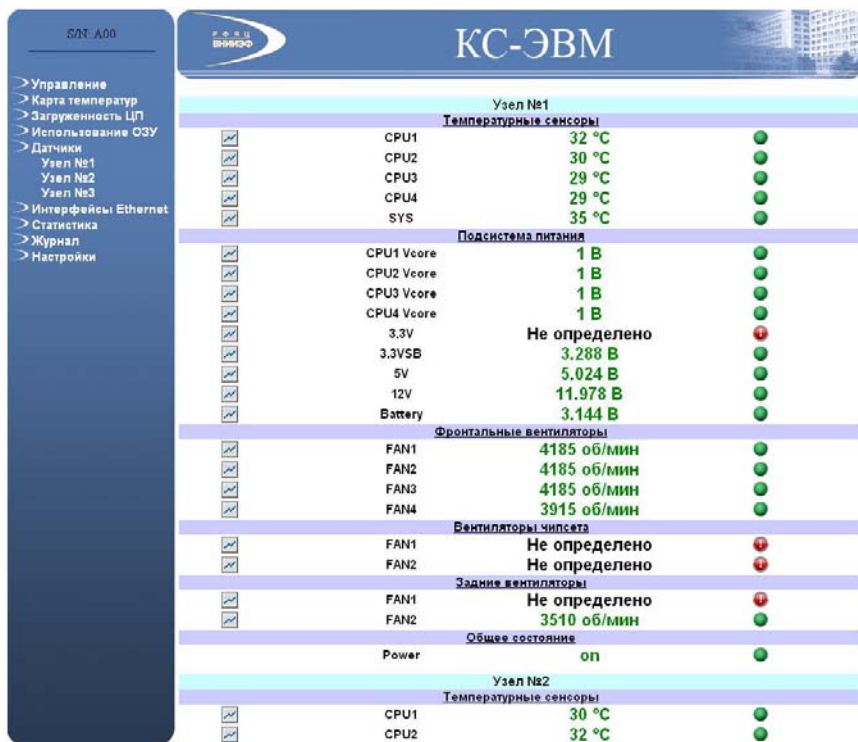


Рис. 13. Датчики



Рис. 14. Интерфейсы Ethernet





Рис. 15. Статистика

Настройка сетевого интерфейса

IP-адрес: 172.19.38.51

Шлюз: 172.19.38.1

Маска подсети: 255.255.255.0

Подтвердить

Настройка имени пользователя и пароля

Пользователь:

Пароль:

Добавить Изменить Удалить

Пользователи	
Shatoichin_av	<input checked="" type="radio"/>
Chernykh_go	<input type="radio"/>
Lashmanov_vn	<input type="radio"/>
Dmitriev_na	<input type="radio"/>
Strelkov_el	<input type="radio"/>

Рис. 16. Настройки

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВИДЕОДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ В ПЯТНЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ АРСА

И. А. Елисеев, А. А. Городнов, И. В. Жуков, Д. П. Николаев, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров

## Введение

При проведении работ по исследованию радиационной стойкости микросхем на малогабаритном ускорителе АРСА [1] одной из важных характеристик ускорителя является равномерность пятна тормозного излучения (ТИ). Распределение дозы в пятне ТИ можно исследовать с помощью нескольких традиционных методов [2]. Один из них основан на применении термолюминесцентных детекторов на основе стекла ИС-7. Однако для ускорителей АРСА, в котором диаметр пятна составляет всего 10 мм, сравнительно большие размеры детекторов (диаметр 8 мм, толщина 1 мм) не позволяют оценить вид распределения дозы ТИ в пятне с достаточной точностью.

Ранее для определения пространственного распределения дозы в пятне ТИ использовались серебродержащие рентгеночувствительные материалы, требующие последующей обработки в проявляющих и фиксирующих растворах в условиях фотолаборатории. В настоящее время для этой цели намного проще использовать сцинтиллирующие экраны и цифровые видеорегистраторы, на которых можно моментально получать изображения, пригодные для обработки. В данной работе применяется разработанный в ИЯРФ интеллектуальный визуальный датчик (ИВД) [3] представляющий собой устройство, объединяющее оптический сенсор и процессор обработки сигналов, управляемое с удаленного компьютера с помощью Ethernet-соединения. Благодаря написанному специально для него программному обеспечению [4, 5], а также благодаря возможности полностью контролировать настройки сенсора, ИВД становится привлекательным инструментом для решения задач, требующих оптической регистрации процессов и явлений, обработки результатов измерений и экспресс-анализа.

Целью данной работы является создание современной системы мгновенной регистрации распределения дозы в пучке ТИ для ускорительных установок различной мощности излучения с короткой длительностью импульса (около 100 нсек).

## Постановка эксперимента

Схема экспериментального стенда, на котором проводилось исследование пространственного рас-

пределения дозы тормозного излучения ускорителя АРСА, приведена на рис. 1.

Стенд содержит ускоритель 1 АРСА с отпаянной рентгеновской трубкой 2 прострельного типа. Окно трубки состоит из танталовой мишени (толщина 50 мкм) и мембраны из титана толщиной также 50 мкм. Для поглощения электронов, проходящих сквозь мишень и мембрану, на окне может устанавливаться алюминиевый фильтр 3. Вплотную к фильтру 3 расположен перископ, состоящий из флюоресцирующего экрана-конвертера 4, корпуса 5 и зеркала 6. Корпус 5 представляет собой два отрезка (колена) алюминиевой трубы, соединенных перпендикулярно друг другу. Общая длина колен перископа – 1300 мм. При регистрации изображений дозовых пятен была отчетливо видна кромка трубы, на краю которой закреплен экран-конвертер, поэтому внутренний диаметр трубы (45 мм) служил в качестве контрольного размера для определения оптического масштаба переноса изображения с конвертера на приемный CMOS-сенсор ИВД.

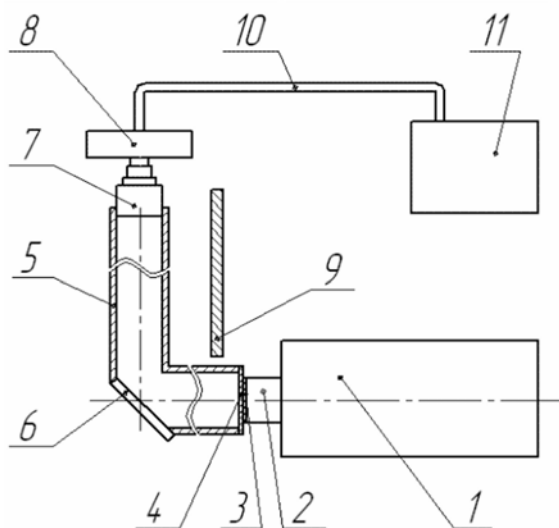


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для определения пространственного распределения дозы ТИ ускорителя АРСА: 1 – ускоритель АРСА; 2 – рентгеновская трубка ТКН-1000; 3 – алюминиевый фильтр (толщина 2 мм); 4 – экран-конвертер; 5 – корпус перископа; 6 – зеркало; 7 – фото-объектив; 8 – интеллектуальный визуальный датчик (ИВД); 9 – свинцовый защитный экран; 10 – кабель связи; 11 – компьютер

На другом конце перископа закреплены фотообъектив 7 и ИВД 8. Перископ необходим для вынесения регистратора (ИВД) из прямого пучка проникающего излучения ускорителя, которое может вывести ИВД из строя. Для защиты ИВД от рассеянного излучения, приводящего к появлению помех на регистрируемых изображениях в форме ярких точек, случайным образом рассеянных по площади кадра, служит свинцовый экран 9. Датчик ИВД через кабель связи 10 подключен к сетевому порту компьютера 11.

Работа стенда заключается в следующем. При срабатывании ускорителя 1 происходит генерация тормозного излучения с мишени трубки 2. ТИ попадает на флуоресцирующий экран 4, который служит конвертером (преобразователем) рентгеновского излучения в видимое изображение. Полученное на экране 4 видимое изображение при помощи перископа передается на фотообъектив 7, который формирует изображение на CMOS-сенсоре датчика 8. При старте прикладной программы в ИВД задается экспозиция 1/10 секунды, частота кадров 10 кадров/сек, при этом имеется возможность зафиксировать вспышку сцинтиллятора, независимо от длительности импульса рентгеновского излучения. ИВД, непрерывно анализируя последовательные кадры видеопотока, автоматически обнаруживает возникновение пятна и передает зарегистрированный кадр через кабель связи на компьютер 10, где он

сохраняется в виде файла изображения. Получаемый кадр имеет размерность 752×480 пикселей при прогрессивной развертке. Алгоритм обнаружения вспышки [4] основан на пороговом анализе освещенности кадра с учетом постоянных шумов матрицы и оптического тракта. Поскольку все регистры сенсора находятся под контролем программиста, это позволяет отключить все авторегулировки и быть уверенным, что любое изменение получаемой картинке связано непосредственно с наблюдаемым объектом.

При создании системы оптической регистрации требуется получить ряд характеристических зависимостей для подтверждения достоверности получаемого изображения, а также калибровки такой системы как измерительного прибора.

В нашем случае требуется знать характеристическую кривую для двух оптических устройств – используемого в ИВД видеосенсора и сцинтиллятора, предназначенного для преобразования тормозного излучения в световое. Для получения характеристической кривой сенсора производилась съемка ступенчатого фотографического клина Kodak с известной последовательностью значений оптических плотностей (21 ступень от 0.05 до 3.05) (рис. 2).

В результате измерений получился практически линейный график зависимости значения пикселей (рис. 3) от интенсивности падающего света.



Рис. 2. Фотографический клин Kodak

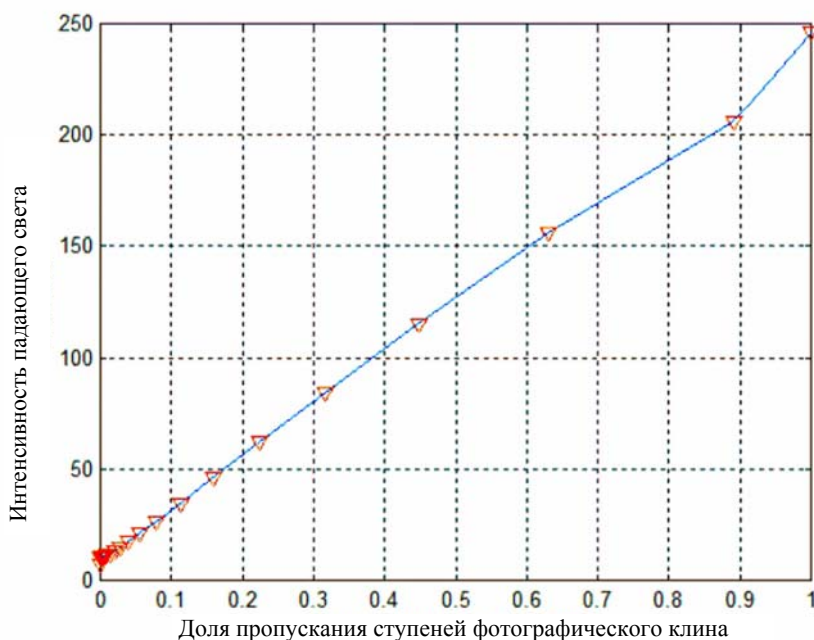


Рис. 3. Зависимость зарегистрированной сенсором интенсивности падающего света от доли пропускания ступеней фотографического клина

Для определения зависимости яркости свечения конвертера, регистрируемой ИВД, от дозы ТИ на конвертере одновременно с регистрацией (при помощи ИВД) светящегося пятна на конвертере проводились замеры доз ТИ на его поверхности. С этой целью на конвертер устанавливался стандартный детектор на основе стекла ИС-7. При срабатывании ускорителя АРСА в рентгеновской трубке происходила генерация ТИ, которое через алюминиевый фильтр 2 (см. рис. 4) и пластину 3 из органического стекла поступало на конвертер 5, вызывая его свечение. При этом доза ТИ измерялась детектором 4, установленном по центру конвертера со стороны трубки, а изображение светящегося конвертера через перископ 6 поступало в датчик ИВД согласно схеме, показанной на рис. 1.

Для определения искомой зависимости величин яркости от дозы ТИ требовалось изменять дозу на конвертере в достаточно широких пределах, что осуществлялось путем изменения расстояния конвертера от окна трубки. Конвертер был жестко закреплен на перископе, поэтому длина оптической оси при этом не менялась. Параметры фотообъектива (zoom, диафрагма) также были жестко зафиксированы и поэтому не служили источником дополнительной погрешности при измерениях. Максимальная доза на конвертере (около 200 рентген) обеспечивалась при установке конвертера вплотную к пластине 3, а минимальная доза (около 50 рентген), соответствующая наименее яркому изображению дозового пятна, получалась при удалении конвертера от пластины 3 на максимальное расстояние  $L = 25$  мм. Расстояние изменялось от 0 до 25 мм с шагом 2.5 мм; при каждом его значении замеры яркости и дозы проводились четыре раза.

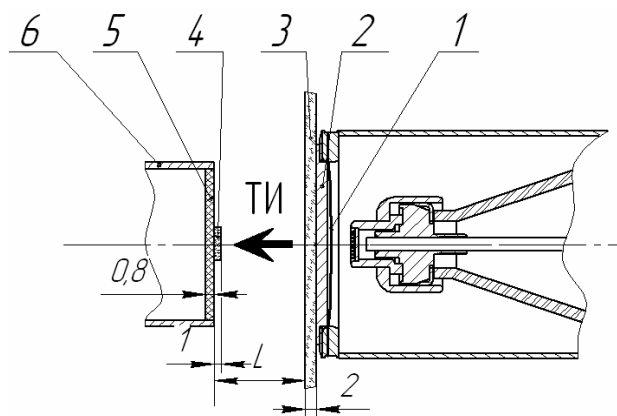


Рис. 4. Схема проведения эксперимента по определению зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере: 1 – мишень; 2 – алюминиевый фильтр; 3 – пластина из органического стекла; 4 – детектор; 5 – экран-конвертер ILFORD; 6 – перископ

В результате экспериментов была получена серия снимков свечения конвертера с разной экспозицией. Один из таких снимков приведен на рис. 5.

Полученные таким образом экспериментальные значения яркостей и доз ТИ были обработаны по методу наименьших квадратов. Аппроксимация производилась с помощью прямой и параболы, которые затем сравнивались друг с другом. График зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы ТИ на конвертере приведен на рис. 6. На полученном графике прямая и парабола практически совпадают, из чего можно сделать заключение, что зависимость яркости от дозы линейна. Поэтому на снимках пятен тормозного излучения величина яркости, регистрируемая ИВД, пропорциональна дозе ТИ, а графики распределения яркости по выбранным сечениям вдоль поверхности конвертера в относительных единицах (например, в процентах от максимального значения) будут являться графиками распределения дозы тормозного излучения.

На рис. 7 приведена типичная фотография дозового пятна на окне рентгеновской трубки ТКН-1000 № 4.02.07, установленной на ускорителе АРСА № 7 на напряжение 1 МВ. Фотография получена на стенде, схема которого приведена на рис. 1. Светлые точки (рис. 7), рассеянные по полю изображения, являются следствием прямого воздействия рассеянных гамма-квантов на сенсор ИВД.

На рис. 8 приведен график распределения дозы излучения вдоль диаметральной линии внутри центрального участка пятна диаметром 10 мм.

Из графика видно, что доза ТИ на краях области диаметром 10 мм снижается от ее максимального значения в центре пятна не более, чем на 28 %, т. е. на поверхности окна трубки выполняется требование ОСТ 11 073.013-2008 по равномерности дозы ТИ.

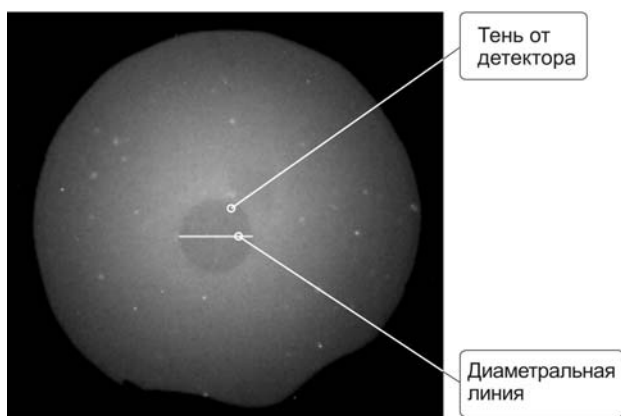


Рис. 5. Снимок светящегося конвертера с закрепленным детектором

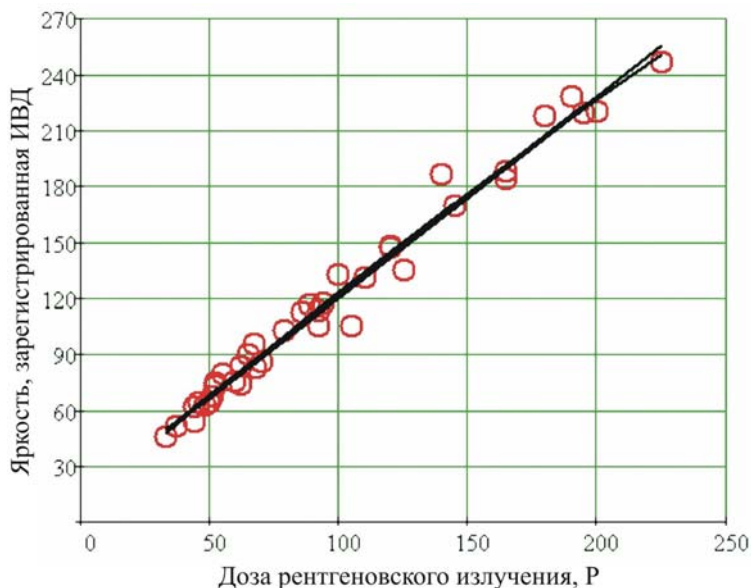


Рис. 6. График зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере

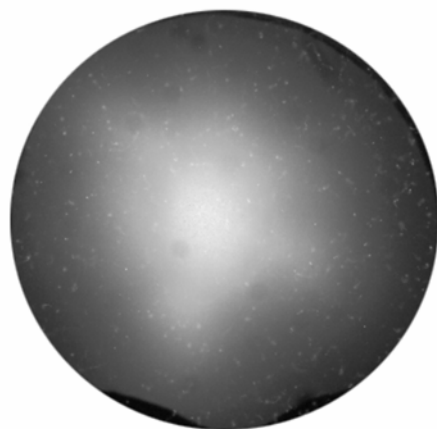


Рис. 7. Типичная фотография пятен тормозного излучения

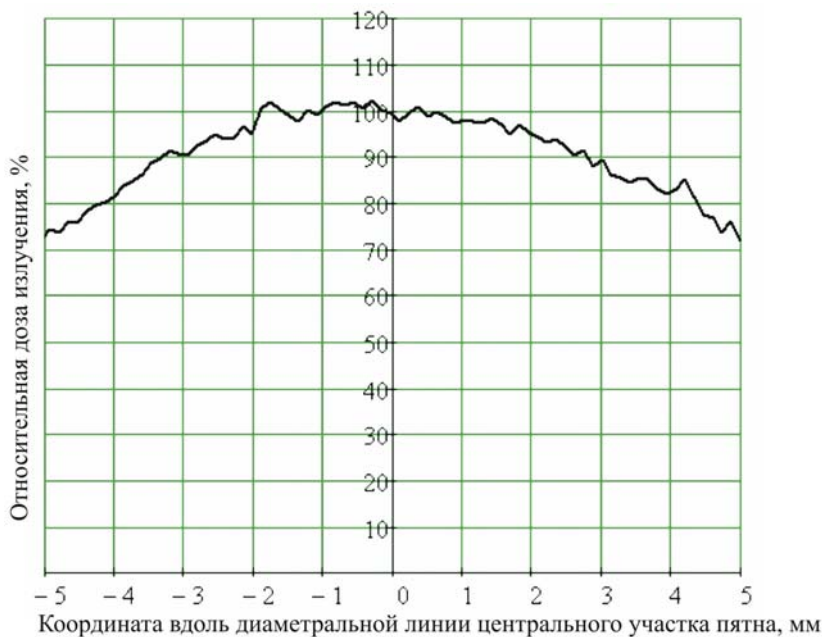


Рис. 4. График распределения дозы тормозного излучения вдоль диаметральной линии внутри центрального участка пятна диаметром 10 мм

## Результаты работы

1. Изготовлен экспериментальный стенд для оперативной оценки пространственного распределения дозы тормозного излучения вблизи окон рентгеновских трубок ускорителей АРСА.

Использование сменных объективов Tokina, Helios-44, Юпитер-11 в составе ИВД позволяет получать качественные изображения дозового пятна с масштабом до 18 пикс/мм на расстоянии 1.3 м. В описываемой серии экспериментов масштаб составил 6 пикс/мм.

2. Зависимость величин яркости свечения конвертера, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере практически линейна; это означает, что графики распределения яркости свечения конвертера совпадают по форме с графиками распределения дозы ТИ.

3. Установлено, что распределение дозы тормозного излучения на окне отпаянной рентгеновской трубки ТКН-1000 № 4.02.07, которая установлена на ускорителе АРСА № 7 на напряжение 1 МВ, удовлетворяет требованию ОСТ 11 073.013-2008 по равномерности дозы ТИ. Доза ТИ на краях области диа-

метром 10 мм снижается от ее максимального значения в центре пятна не более чем на 28 %.

4. В ходе проведенной серии экспериментов проверена адекватность ИВД условиям работы на ускорителе АРСА (выявлены большой запас по оптической чувствительности, слабая зависимость от радиационного фона в помещении и т. д.), что показывает достижимость автоматического режима регистрации на основе применения ИВД.

5. Экспериментальная оценка пространственного распределения дозы тормозного излучения малогабаритного ускорителя АРСА с помощью интеллектуального визуального датчика ИВД показала, что датчик ИВД пригоден для этой цели и может успешно применяться для создания устройства регистрации распределения дозы, необходимого для контроля параметров рентгеновских трубок ускорителей АРСА, разборных вакуумных камер и других ускорительных трубок.

## Литература

1. Small-Size Pulse ARSA Accelerator for Radiation Research. Ilyash S. L., Kalinovskaya N. I., Gon-

charova V. F., Korolev V. N., Pukhov S. P., Morenko S. A., Avilov E. A., Yuriev A. L. // Proceeding of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies (Varna, Bulgaria, 1–6 June 2003). – 2003. P.591–594.

2. Метод дозиметрии ИКС. М., Атомиздат, 1977. С. 222. Авт. Бочвар И. А., Гимадова Т. И. и др.

3. Жуков И. В., Ершков А. А., и др. Разработка лабораторного образца интеллектуального визуального датчика. Доклад на VI-й научно-технической конференции «Молодежь в науке», 30 октября – 1 ноября 2007 г., г. Саров. Стр. 53.

4. Жуков И. В., Городнов А. А., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008615152, «Программа автоматической видеорегистрации импульсных событий», 24.10.2008.

5. Жуков И. В. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615153, «Программа управления и контроля интеллектуального визуального датчика», 24.10.2008.

# ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ НА МНОГОЦЕЛЕВОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ (МИК) РФЯЦ-ВНИИЭФ

*И. В. Богодяж, А. В. Гришин, А. А. Застылов, С. А. Костин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Важное место в работах по созданию новых и совершенствованию существующих видов вооружений занимает наземная отработка образцов вооружений, их компонентов и частей. Во ВНИИЭФ значительная часть этой работы выполняется в многоцелевом испытательном комплексе (МИК).

В МИК существует ракетно-катапультирующая установка (РКУ), которая предназначена для проведения испытаний, моделирующих условия максимально приближенные к натурным (рис. 1) [1, 2]. Неотъемлемым этапом отработки изделий на РКУ являются измерения широкого спектра параметров, объективно характеризующих состояние изделия в процессе испытаний и условия его нагружения. Достоверность и полнота измерений оказывают существенный вклад в последующие этапы работ.

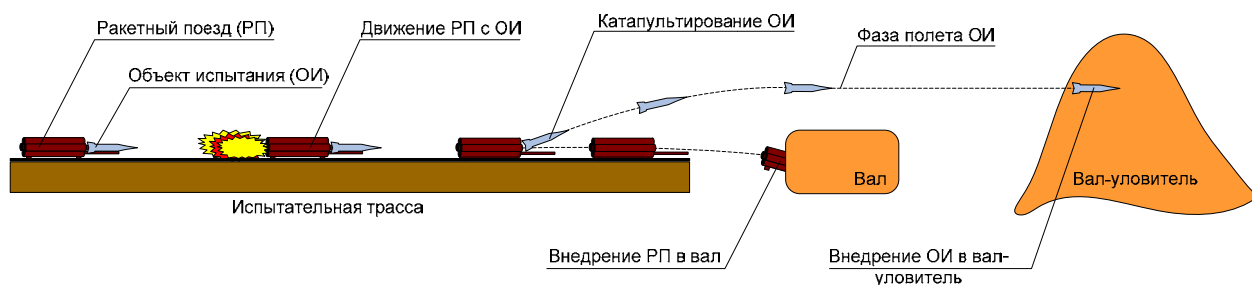
На участке свободного полета объекта испытания (ОИ) единственной возможностью получить информацию с его борта является использование радиотелеметрии [3]. Поэтому радиотелеметрические измерения являются наиболее важным источником информации при проведении испытаний на РКУ. В испытаниях на РКУ используются радиотелеметрические системы (РТС) с время-импульсной модуляцией (ВИМ). Такой выбор обусловлен малым временем протекания экспериментов, высоким уровнем помех в радиоканале, вследствие многолучевого распространения радиосигнала, а также такими требованиями к РТС, как высокая информативность, надежность передачи информации, ограниченные массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление бортовой аппаратуры.

В основу схемы формирования ВИМ-последовательности заложен принцип преобразования выходного напряжения первичных измерительных преоб-

разователей (ПИП) в пропорциональный временной интервал и передачи начала и конца этого интервала по радиоканалу в виде соответственно «опорного» и «измерительного» радиоимпульсов в реальном масштабе времени [5, 6].

Информация формируется в виде многоканального сообщения (кадра) (рис. 2), которое затем передается по радиоканалу. Признаком окончания кадра является отсутствие измерительного импульса в последнем канальном интервале кадра. Число каналов зависит от варианта используемой РТС и может быть равно 8, 16 или 32 [3].

Спецификой испытаний на РКУ является наличие большого количества помех в радиоканале, обусловленных настильными траекториями полета изделия в относительно узком лесном коридоре с множеством сооружений. В условиях этого узкого коридора прием информации осуществляется в «угон». Это приводит к многолучевому распространению радиосигнала [8]. При наложении друг на друга радиосигналов в условиях многолучевого приема происходит их интерференция, проявляющаяся в появлении ложных или исчезновении истинных импульсов. Плотность сбоев радиотелеметрической информации (РТМИ) достигает своего максимума на этапе нагружения изделия, где цена информационного слова чрезвычайно высока. Это обуславливает необходимость принятия мер по восстановлению каждой единицы информации. Бортовая передающая и наземная приемная части радиотелеметрической системы реализованы на современном уровне и потенциально обеспечивают максимальную помехоустойчивость, поэтому работа по совершенствованию средств регистрации РТМИ, алгоритмов и методов ее обработки информации является актуальной.





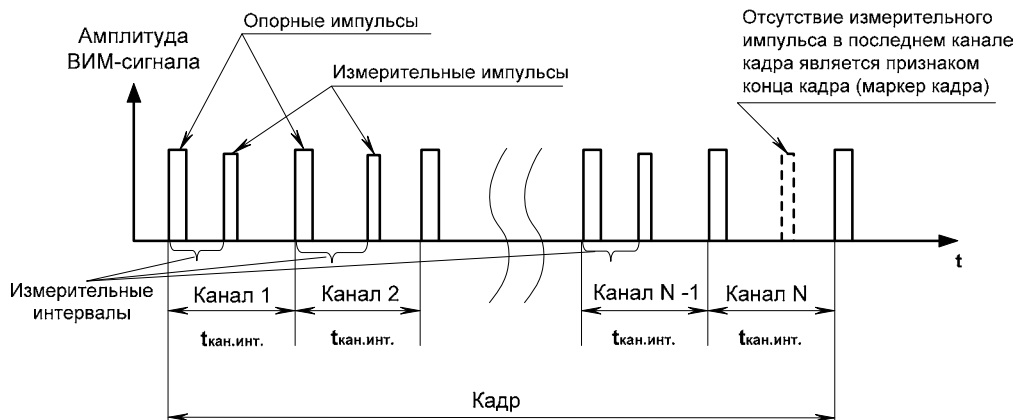


Рис. 2. Структура кадра – время импульсной последовательности

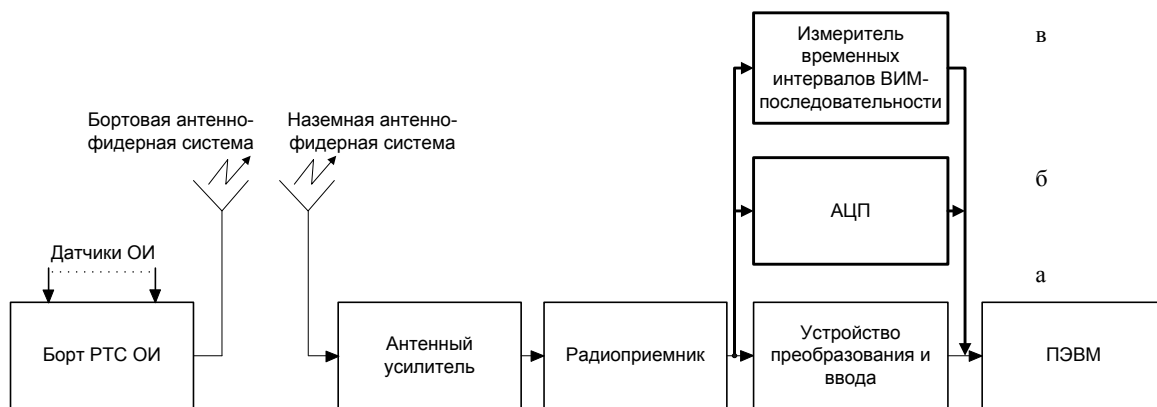


Рис. 3. Структурная схема системы регистрации: а – с применением устройства преобразования и ввода (УПИВ); б – при регистрации ВИМ-сигнала в аналоговом виде; в – при регистрации ВИМ-сигнала в виде оцифрованных временных интервалов

В радиотелеметрической системе, используемой в МИК, преобразование радиотелеметрической информации осуществляется в реальном времени экспериментом устройством преобразования и ввода информации (УПИВ) [7], которое декодирует телеметрическую информацию и в виде параллельного двоичного кода обеспечивает ее ввод в ПЭВМ (рис. 3, а). Алгоритм преобразования РТМИ, выполняемый УПИВ, включает в себя: контроль поступающих на вход импульсов, их классификацию как опорных или измерительных, формирование кода приращения времени или кода значения параметра в зависимости от результата классификации, восстановление пропущенных опорных импульсов на участках ВИМ-последовательности с нарушенной структурой.

Алгоритм работы УПИВ, реализованный на жесткой логике и работающий в режиме реального времени, на участках с нарушениями кадровой структуры зачастую производит некорректную обработку входного сигнала. Информацию, полученную в ходе такой обработки, невозможно подвергнуть восстановлению программными средствами с более «интеллектуальными» алгоритмами. В конечном итоге это ведет к уменьшению объема достоверной

информации и, возможно, к необходимости проведения дополнительных экспериментов, что при высокой их стоимости крайне нежелательно.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является разработка гибкого алгоритма преобразования РТМИ и использование многопроходной обработки. Входной информацией для этого алгоритма должна быть исходная (некорректированная) РТМИ, регистрируемая в ходе эксперимента. Предварительные проработки показывают возможность регистрации ВИМ-сигнала в виде его мгновенных значений (т. е. в форме огибающей) (рис. 3, б) или в виде оцифрованных интервалов времени между соседними импульсами (рис. 3, в). Такой способ позволит регистрировать РТМИ после детектора и сосредоточится на ее постобработке. Основная сложность постобработки заключается в реализации алгоритма, способного получать на выходе наиболее полную информацию, особенно при наличии сбоев. При отсутствии сбоев в принимаемой РТМИ обработка сводится к ее расшифровке и раскоммутации по измерительным каналам кадра, но в алгоритме должны быть предусмотрены меры для случая появления нарушений структуры ВИМ-последовательности.

На основе исследования участков РТМИ с нарушенной структурой выявлены следующие виды сбоев (рис. 4) и разработаны алгоритмы их обработки.

### 1. Внутрикадровые сбои:

- присутствие внутри кадра нескольких канальных интервалов, в которых отсутствует измерительный импульс. В этом случае к условиям достоверности кадра добавлялась проверка его длительности;

- отсутствие опорных импульсов внутри кадра. В этом случае после последнего выделенного канального интервала кадра, суммируются все последующие значения величин интервалов времени между импульсами время-импульсной последовательности до тех пор, пока сумма не будет кратной значению канального интервала с заданным допуском. Таким образом, определяется количество отсутствующих опорных импульсов («сбитых» канальных интервалов) и определяются времена их прихода. В случае наличия в восстановленных канальных интервалах измерительных импульсов, определяются времена их прихода и соответствующие им измерительные интервалы.

### 2. Межкадровые сбои:

- присутствие в 32 канальном интервале (кадровой паузе) ложных измерительных импульсов находящихся вне защитных интервалов;

- отсутствие одного или обоих опорных импульсов 32 канального интервала (образующих кадровую паузу).

Входной информацией для алгоритма преобразования РТМИ, вне зависимости от способа регистрации, являются массивы числовых значений, которые представляют собой интервалы времени между всеми парами соседних импульсов ВИМ-последовательности и времена их прихода. То есть после регистрации РТМИ ее необходимо привести к виду пригодному для дальнейшей обработки.

Обработке информации предшествует ее анализ с определением зависимостей между интервалами времени и расчет характерных параметров обработ-

ки, вариации которых в последствии позволят произвести надежную и достоверную обработку.

Многokратная обработка с вариацией параметров в соответствии с установленными зависимостями позволяет получить надежную информацию на участках с нарушенной структурой РТМИ, что не могут в полной мере обеспечить применяемые в настоящее время в МИК радиотелеметрические системы, осуществляющие обработку в реальном времени эксперимента.

Алгоритм обработки и декодирования радиотелеметрической информации основан на поиске последовательности кадров, которые признаются достоверными при соответствии их следующим критериям:

- последовательность кадров состоит из числа канальных интервалов, кратных количеству каналов РТС;
- длительность последовательности кадров кратна длительности кадра в заданном допуске;
- длительность канального интервала, находится в заданном допуске;
- в последнем канальном интервале последовательности кадров отсутствуют измерительные импульсы (кадровая пауза).

Указанные условия достоверности кадров РТМИ выработаны на основе априорной информации об эталонной кадровой структуре РТМИ, а также анализа реальной кадровой структуры, принимаемой с борта ОИ, включая анализ сбойных участков.

Процесс обработки РТМИ можно разделить на три основных этапа (рис. 5):

- поиск последовательности кадров;
- поиск в найденной последовательности кадров последовательности канальных интервалов;
- поиск в найденной последовательности канальных интервалов измерительных импульсов.

На участках с нарушенной структурой РТМИ может иметь место, как отсутствие опорных или измерительных, так и наличие дополнительных (ложных) импульсов.

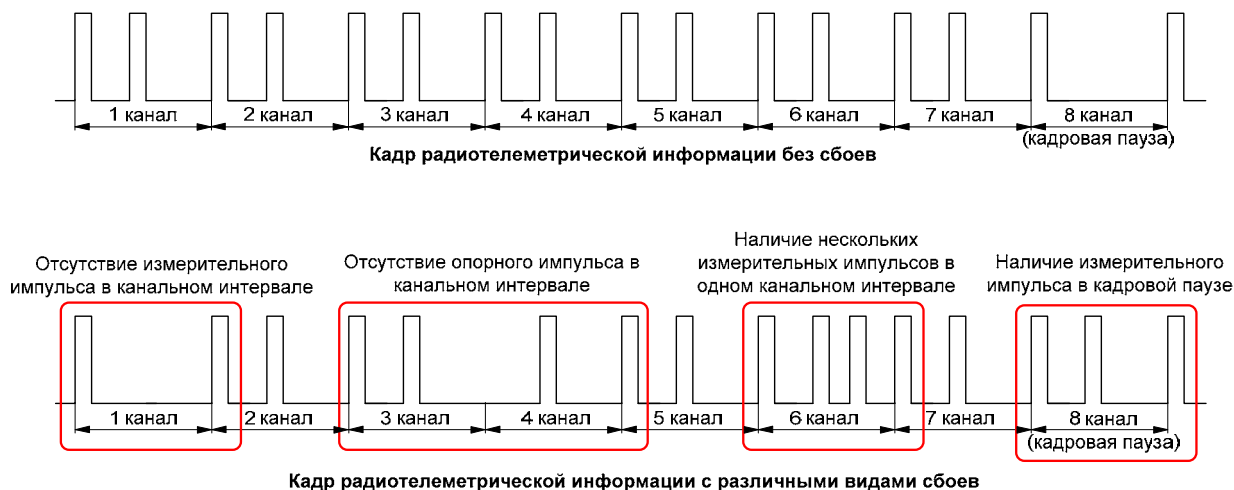


Рис. 4. Виды сбоев структуры кадра РТМИ

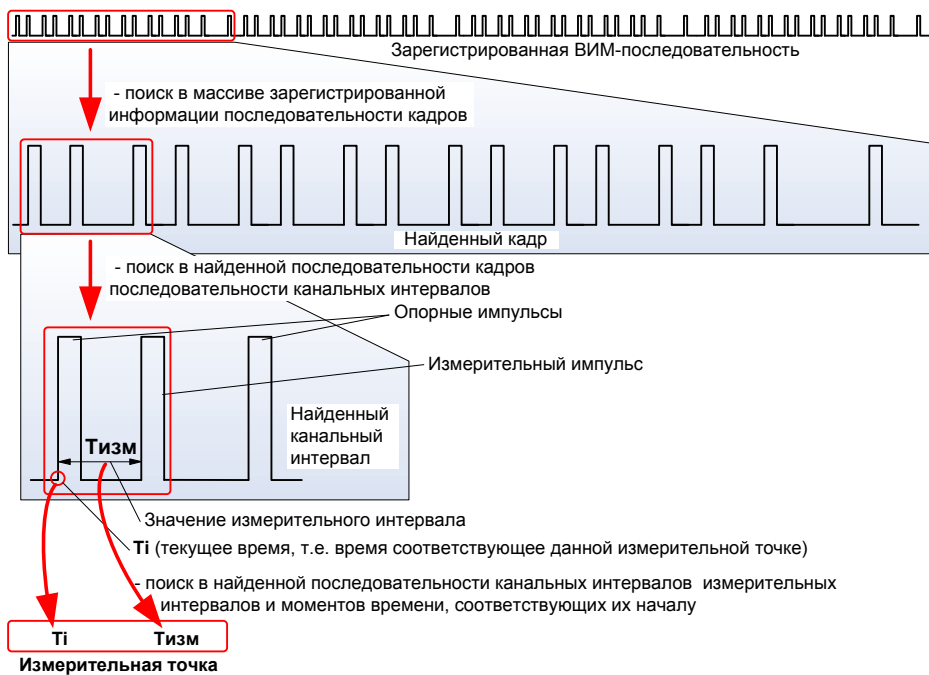


Рис. 5. Основные этапы обработки РТМИ

Наличие ложных импульсов не вызывает проблем при обработке РТМИ. В случае присутствия в канальном интервале нескольких измерительных импульсов (истинный и ложные) в выходной файл выводится информация соответствующая каждому измерительному импульсу.

Основной проблемой, при обработке информации является отсутствие опорных импульсов ВИМ-последовательности. В ходе обработки РТМИ на сбойных участках производится их восстановление (опорных импульсов) на основе априорно известной структуры кадра. Это возможно, так как структура кадра является постоянной и неизменной для каждой РТС, и опорные импульсы имеют строго определенное положение в кадре с заданными допусками. На основании этого определяют их место и время в текущем кадре, с привязкой к единой шкале измерительного процесса. Дальнейшую обработку информации проводят с учетом восстановленных таким образом опорных импульсов.

Одним из видов внутрикадровых сбоев (рис. 4) также является присутствие в канальном интервале нескольких измерительных импульсов (истинный и ложные). В этом случае в выходной файл выводится информация соответствующая каждому измерительному импульсу. При полном отсутствии в канальном интервале измерительных импульсов восстановить информацию о значении параметра в данном случае не представляется возможным.

Предлагаемый алгоритм, реализованный в виде программы по обработке радиотелеметрической информации, был опробован в условиях МИК РФЯЦ-ВНИИЭФ и показал свою работоспособность. Было проведено сравнение результатов обработки предла-

гаемым и штатным способом (с помощью устройства преобразования и ввода информации УПИВ, в реальном времени). Результаты обработки информации, полученной в эксперименте, приведены в виде графиков измеряемых параметров на рис. 6.

Сравнение показало, во-первых, адекватность работы предлагаемого способа, а во-вторых, возможность получения с помощью него большего объема достоверной информации, что свидетельствует о его эффективности.

В настоящее время на МИК планируется обработка перспективных изделий, оснащенных высокоточными датчиками с цифровыми выходами. Их использование повысит точность измеряемых параметров. Испытание таких изделий предъявляет повышенные требования к радиотелеметрическим системам МИК в части пропускной способности (информативности), качества передачи и обработки РТМИ.

В связи с этим появляется необходимость передачи информации по радиоканалу в виде цифровых слов. Удачным представляется использование существующих методов передачи ВИМ-сигнала аналоговой телеметрии в совокупности с «цифровой» трактовкой канального интервала, при которой «0» и «1» в информационных словах кодируются присутствием в канальном интервале измерительного импульса в том или ином положении.

Предварительная проработка показывает, что передача цифровой телеметрии по радиоканалу будет сопряжена с теми же сложностями, что и передача аналоговой информации. Это означает необходимость применения описанных технических решений в перспективных работах ВНИИЭФ и подтверждает актуальность данной работы.

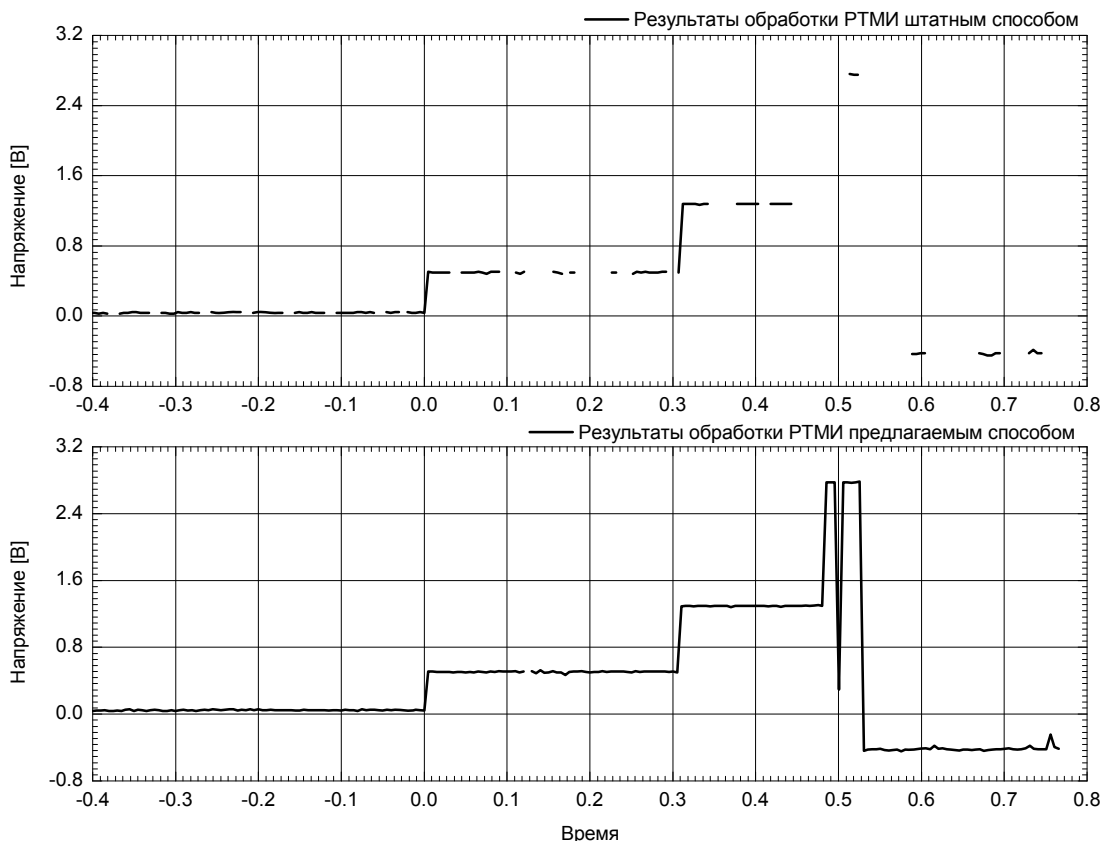


Рис. 6. Сопоставление результатов обработки РТМИ, полученных по штатному и предлагаемому способам

Внедрение в процесс обработки радиотелеметрической информации рассматриваемого способа позволит повысить качество и объем достоверной РТМИ, получаемой в ходе испытаний, тем самым, повысив эффективность наземной отработки перспективных средств вооружения в целом, что, в свою очередь, может снизить потребность в натурных испытаниях.

## Литература

1. Файков Ю. И. Проблемы совершенствования РАВ в современных условиях. Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
2. Баландин В. В., Бухтояров В. Н., Викторов В. А., Маркелова О. Н., Подгорный И. Ф., Садчиков Г. Д., Файков Ю. И., Фатеев Ю. А. Постановка баллистических испытаний на ракетном треке ВНИИЭФ. Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
3. Файков Ю. И., Кортюков И. И. и др. Измерительные средства многоцелевого испытательного комплекса ВНИИЭФ. Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
4. Бердников В. А. и др. Функциональная отработка боевых частей образцов РАВ на ракетном треке МИК РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сборник докладов III научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004.
5. Никольс М. Х., Раух Л. Л. Радиотелеметрия. М: Издательство иностранной литературы, 1958.
6. Методика выполнения измерений при проведении испытаний изделий на экспериментальных установках пл. 22 с использованием радиотелеметрических средств преобразования и передачи информации. 1606 МВИ 1-01.
7. Устройство преобразования и ввода информации УПИВ-СКПА. Техническое описание и руководство по эксплуатации. Утв. 1996 г. арх. ТУ-3537.
8. Бернард Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издание второе, исправленное. М: Издательский дом «Вильямс», 2003.

# КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ РАЗРАБОТКИ ПУЛЬТА ПИТАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО АППАРАТА

К. В. Климов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В докладе «Комплексное моделирование на примере разработки пульта питания рентгеновского аппарата» рассмотрен метод многостороннего моделирования предмета проектирования, взаимосвязь моделей, программного обеспечения. Рассмотрены преимущества метода с точки зрения получения наиболее полной картины создаваемого объекта и трудности, связанные с этим. Приведено сравнение технических характеристик разработанного пульта и его аналога. Освещены вопросы эффективности метода и возможности его усовершенствования по мере развития средств вычислительной техники, программ моделирования и производственно-технологического оборудования с числовым программным управлением.

Метод комплексного моделирования при проектировании изделия – это совокупность программ и способов их взаимодействия при построении моделей, характеризующих изделие с разных сторон и необходимых для его разработки, изготовления и эксплуатации.

Главной является трехмерная (3D) модель. На ее основе создаются двухмерные (2D) модели для выпуска конструкторской документации (КД), технологические модели для изготовления деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), для разработки печатных плат. 3D модель – это основа и для физического моделирования (прочностного, теплового и др.). Все модели связывает общая информационная база данных (БД), с которой работают программы построения моделей (рис. 1).

Рассмотрим практическое применение метода на примере разработки пульта питания для рентгеновского аппарата.

Переносной рентгеновский аппарат для промышленной дефектоскопии состоит из моноблока, пульта питания, дистанционного пульта управления и соединительных кабелей (рис. 2).

Пульт питания, согласно своему названию, вырабатывает питание для работы всего аппарата.

При мощности потребления 200 Вт и к.п.д. порядка 70 % в пульте объемом 15 л возникает перегрев воздуха (60...70 °С). Для снижения температуры используется принудительная вентиляция (активная система отвода тепла), которая ухудшает защищенность пульта, увеличивает его габариты, вес и стоимость.

Идеей для разрабатываемого пульта является использование силовых электронных модулей с развитой теплоотводящей поверхностью, установленных на внутреннюю сторону радиатора, который является стенкой корпуса пульта и обеспечивает эффективную теплопроводность и естественную конвекцию с окружающей средой (пассивная система отвода тепла). При этом уменьшаются габариты, вес, стоимость, улучшаются другие характеристики.

Вернемся к рассмотрению составных частей комплексного моделирования. Чем точнее описан элемент, тем точнее модель. Чем больше в БД уже описанных моделей, тем быстрее моделирование сборки. Чем эффективней программа моделирования, ее связь



Рис. 1. База данных



Рис. 2. Переносной рентгеновский аппарат

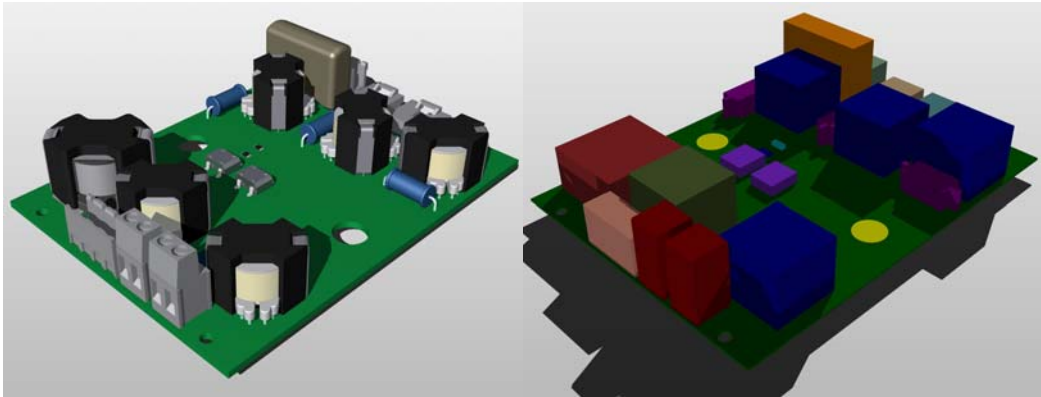


Рис. 3. Печатная плата

с другими программными комплексами и выше характеристики компьютера, тем качественнее модель.

2D моделирование – промежуточная стадия между 3D моделью и изготовлением детали. Это либо плоский чертеж для ручного изготовления, либо файл для работы станка с ЧПУ. Наиболее гибким и популярным инструментом для оформления чертежей является AutoCad, и чем лучше связь между программой 3D моделирования и AutoCad, тем легче жить в условиях ЕСКД. В настоящее время AutoCad является модулем в составе системы Inventor PRO, разработанной фирмой Autodesk. Соответственно между ними обеспечена полная интеграция. Данная система предоставляет удобный механизм передачи данных различным программам, например, позволяет легко конвертировать информацию в Corel Draw для файла лазерной гравировки. Несомненно, подобная ветвь комплексного моделирования, в отличие от чертежного хозяйства, в скором времени будет доминировать на станках с ЧПУ.

Несколько другой порядок взаимодействия 3D модели с комплексом программ проектирования печатных плат Mentor Graphics, поскольку в самой Mentor Graphics есть 2D, упрощенное 3D, технологическое и физическое моделирование. Но и здесь программная интеграция, а особенно интеграция по БД

элементов обеспечивает методологию комплексного моделирования.

Пример последовательности предварительного 3D моделирования печатной платы в Inventor, упрощенной 3D модели, полученной после трассировки печатной платы Mentor Graphics, и окончательной 3D модели, используемой в модели пульта, представлен на рис. 3.

Физическое моделирование можно сравнить с проектировочными и поверочными расчетами прочности конструкции, тепловыми и другими расчетами. При этом не требуется высокая квалификация расчетчика, важно определиться с начальными условиями и степенью точности, чтобы не «загнать» компьютер. Иногда для этого приходится сознательно упрощать 3D модель. Комплекс расчетных программ Ansys имеет встроенный транслятор почти любых моделей в собственный формат.

Наиболее популярные программы для инженерного моделирования имеют встроенную программу статических и динамических прочностных расчетов по технологии Ansys.

На примере пульта питания показаны прочностное моделирование элементов конструкции – ручки и теплового моделирование – радиатора (рис.4).

Таким образом, итогом проведенных и описанных выше работ, явился пульт питания ТРПП63 (рис. 5).



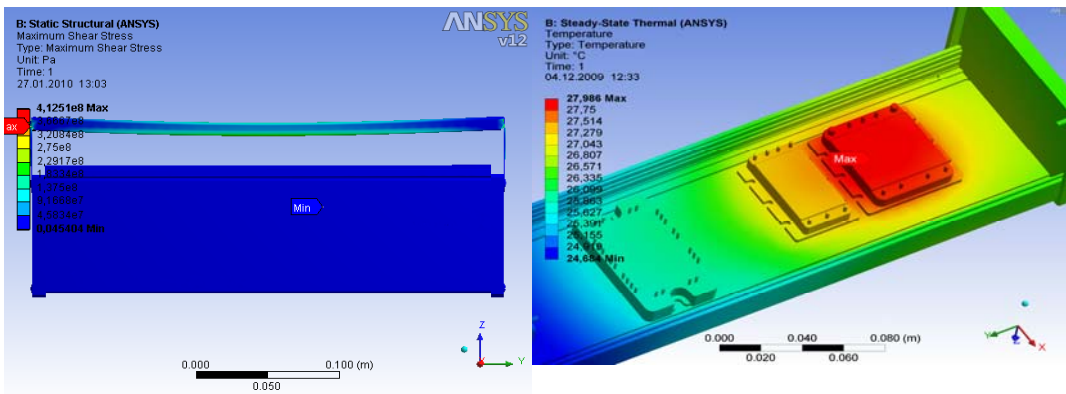


Рис. 4.



Рис. 5. Пульт питания ТРПП63

Сравнительные характеристики пульта ТРПП63 и его аналога ТРПП62-01

Характеристики		ТРПП62-01 (прототип)	ТРПП63
Корпус	Кол-во деталей корпуса	~80	~16
	Габариты (мм)	356x142x390	110x100x350
	Объем (л.)	15	3
	Перегрев (°C)	15 °C (принудительная вентиляция)	18 °C (естественная конвекция)
	Защищенность	IP42 (в кофре)	IP54 (IP66)
ПП	Кол-во	7	4
ЭРИ	Кол-во	~320	~200
	Стоимость (руб.)	~35500	~20000
Общие	Вес (кг)	~10	~3,5
	Трудоемкость изготовления (н/ч)	155	70–90
	Ориентировочная стоимость (руб.)	~217000	~100000



## Заключение

Такой способ проектирования дает положительный результат, который заключается в том, что с использованием в комплексе нескольких освоенных и связанных единой БД программ ограниченными трудовыми ресурсами позволяет выполнять качест-

венное проектирование. А более глубокое освоение программного обеспечения, позволит решать более сложные задачи, стоящие перед разработчиками. Например, разработка рентгеновского моноблока на сотни киловольт, сотни ватт, минимальных размеров настоятельно требует моделирования электрических, тепловых, радиационных полей.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ АУТЕНТИЧНОСТИ ИНФОРМАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

*Э. Ю. Кузнецова, И. А. Немченко, И. И. Мулин, Ю. А. Анисимов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Дистанционное управление с одной стороны открывает новые возможности, с другой – ставит новые задачи. Одной из задач является обеспечение безопасности в системе контроля и передачи управляющей информации. Особое место в решении подобных задач занимает контроль достоверности результатов тестирования и управления. Сюда же относится задача построения системы разграничения доступа в различных программных комплексах, предназначенных для автоматизации процесса управления. Но ориентация общей системы на дистанционное управление вносит свои коррективы. Так у ответственного за прибор, подлежащий тестированию, возникает потребность в возможности использования данного программного обеспечения на своей локальной машине.

Сформулируем основные проблемы, связанных с организацией обеспечения безопасности в системах дистанционного управления и контроля данных. Целью работы является формирование подходов к решению задачи достоверности результатов тестирования и управления и построение системы, обеспечивающей надежность и достоверность передачи данных. Разрабатываемая система ориентирована на локальный пакет дистанционного контроля и управления.

Вопросы, возникающие при решении задачи контроля достоверности, следующие.

1. У злоумышленника существует возможность создания универсального редактора файлов результатов тестирования. Способом решения является использование механизма открытых параметров. Кроме этого, предлагается использовать генерацию разнородных алгоритмов преобразования/восстановления. В данном случае будет обеспечено построение сложного для анализа разнородного кода, что препятствует построению обратного алгоритма и подбора данных о результатах тестирования.

2. У злоумышленника существует возможность создания универсальной программы просмотра файлов, содержащих сведения по управлению объектами и результаты тестов исправности работы устройств. Решение может быть представлено в разработке нового способа хранения данных, но так же возможно и использование стойких криптоалгоритмов. Так если файлы управления хранятся в текстовом виде, то они подвергаются преобразованию для обеспечения безопасности хранящейся в них информации. Но при воздействии на данные файлы злоумышленник, об-

ладающий дополнительной информацией, может получить все необходимые ему сведения. Если разработать механизм чтения/записи данных, использующий записи различных типов, то, обладая параметром для восстановления файлов, злоумышленник не сможет получить полную информацию, хранящуюся в них, так как необходимо знать формат сохраняемых файлов. Так, например, сначала мы сохраняем блок с названием устройства, потом – идентификатор кодов управления, затем – данные самих кодов, и после сохраняем данные результатами тестов. Дополнительную сложность должен внести генератор алгоритмов преобразования/восстановления. Путем хранения данных в пакетах, передаваемых ответственному за определенное устройство и преобразованных различными алгоритмами, будет достигаться дополнительная сложность создания универсальной программы просмотра.

3. Возможность модификации программы файлов системы управления. Способом решения является применение разнородных кодов, два экземпляра таких кодов могут полностью не совпадать, но при этом функционально они являются копиями. Их использование усложняет внесение изменений в программу. Точнее, внести исправление в конкретный экземпляр приложения не представляет большой сложности, а вот применить этот метод модификации к другой копии невозможно. Из этого следует, что написание злоумышленником универсальной программы, изменяющей разнородные коды, является задачей сверхвысокой сложности.

В результате возможно следующее построение системы: объект защиты представляет собой файл, который хранится в преобразованном виде. Программа-загрузчик восстанавливает его непосредственно в памяти и затем запускает. Каждый файл преобразован своим методом, а, следовательно, его модификация невозможна. Возможно создание программы, взламывающей систему тестирования и базирующейся на методах динамической модификации памяти программы или на создании и загрузке слепок данных в память. Но создание подобной программы сложно и требует высокой квалификации.

Разрабатываемая система обеспечения безопасности ориентирована на локальный пакет дистанционного управления. Базы с кодами управления, целями системы и другой необходимой информацией хранятся непосредственно в приборе (объекте управ-

ления). В таком случае уязвимым местом становятся каналы связи между центром управления и объектами управления. Под уязвимыми объектами понимаются различные файлы (например, с результатами промежуточного тестирования), с помощью которых и организуется информационное взаимодействие между элементами системы. На рис. 1 изображена структурная схема одной из возможных систем дистанционного управления.

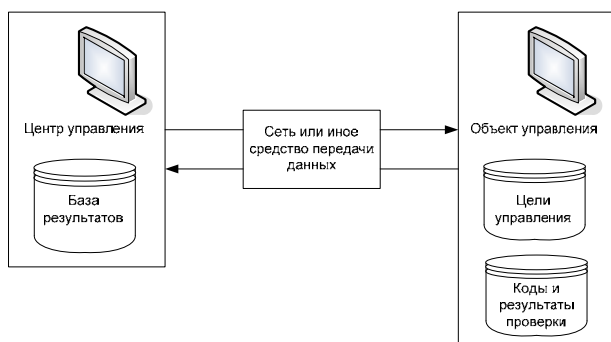


Рис. 1. Структурная схема системы управления

К объектам системы дистанционного локального управления, требующим обеспечения безопасности, можно отнести:

- данные, являющиеся информационно-управляющей составляющей системы тестирования и контроля и хранящиеся в центральном устройстве; в этом случае целесообразно ограничение доступа не только к базам заданий/результатов, но и к вспомогательной информации об объектах управления;
- исполняемые файлы систем тестирования; эти файлы могут быть подвержены модификации с целью изменения алгоритма работы.

Один из путей обеспечения безопасности – это создание уникальных программных модулей, то есть модулей, для которых неприменима простая программа-взломщик, модифицирующая определенную последовательность байт. Предлагаемое решение генерации таких модулей основано на применении разнородных алгоритмов преобразования.

Создаваемый алгоритм преобразования должен быть достаточно прост, но при этом он должен обеспечивать асимметричность и быть достаточно сложным для анализа. Исходя из этих позиций, возникла необходимость создания разнородных алгоритмов преобразования.

Основная сложность заключается в построении генератора, который должен выдавать на выходе два алгоритма. Один – для преобразования, другой – для восстановления. Параметров у этих алгоритмов преобразования/восстановления нет. Можно сказать, что они сами являются параметрами или содержат параметр внутри. Разнородные коды устроены таким образом, чтобы производить уникальные преобразования данных, то есть два алгоритма преобразования

включают в себя различные способы преобразования. Для их восстановления необходимо использовать только соответствующий алгоритм восстановления, который был сгенерирован в паре с алгоритмом преобразования.

Уникальность создания таких алгоритмов должен обеспечить разнородный генератор кода. Выполняться такие алгоритмы будут в виртуальной машине. Анализ таких алгоритмов весьма труден и нецелесообразен с точки зрения временной трудоемкости.

Несмотря на то, что преобразования над данными будут достаточно тривиальны, на практике вероятность генерации двух одинаковых алгоритмов стремится к нулю. В качестве элементарных действий следует использовать такие нересурсоемкие операции, как сложение с каким-либо числом или, например, побитовое "исключающее ИЛИ" (XOR). Но повторение нескольких таких преобразований с изменяющимися аргументами операций (в зависимости от адреса преобразуемой ячейки) делает алгоритм достаточно сложным. Генерация каждый раз новой последовательности таких преобразований с участием различных аргументов усложняет анализ алгоритма.

К преимуществам применения разнородных алгоритмов преобразования для систем управления можно отнести следующее:

- слабая очевидность принципа построения системы обеспечения безопасности;
- сложность создания универсальных средств для обхода системы безопасности;
- легкая реализация системы асимметрического преобразования;
- возможность легкой, быстрой адаптации и усложнения такой системы;
- возможность расширения виртуальной машины с целью сокрытия части кода.

В результате работы рассмотрены различные методы, применяемые для создания разнообразных систем обеспечения безопасности, рассмотрена возможность их применения для систем дистанционного управления. Проанализированы ключевые места, требующие решения, и предложены варианты осуществления, отмечены преимущества и недостатки. Предложены новые пути реализации обеспечения безопасности для систем, используемых в монопольном режиме.

## Литература

1. Брассар Ж. Современная криптология. М. ПОЛИМЕД, 1999.
2. Шевелев М. Ю. Программно-аппаратная система контроля и защиты информации. Томск: ТУСУР, 2001.

# ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

*Т. И. Латыпов, В. Л. Ведерников, А. М. Масыгин, А. В. Пиголкин, С. М. Хлестков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На настоящий момент средства автоматизации производства играют все более важную роль – без них не обходится создание практически ни одного изделия, используемого в повседневной жизни. По мнению большинства независимых аналитиков и оценке аналитической компании IDC, к российским промышленным предприятиям уже пришло понимание необходимости использования систем автоматизированного проектирования (САПР) для сохранения и повышения конкурентоспособности производства. Однако прогресс в этой области сдерживается рядом проблем: с одной стороны – спрос на САПР и степень его применения в промышленности растет, а с другой – возможности применяемых систем зачастую используются не в полной мере, что влечет за собой нерациональное использование средств предприятий и ведет к увеличению себестоимости конечной продукции.

Увеличение количества предприятий, инвестирующих в информационно-технологические (ИТ) решения, приведет к повышению уровня российской промышленности в целом. В России предприятия предпочитают вкладывать деньги в основные фонды, в побочный бизнес, финансируя ИТ по остаточному принципу. На Западе ситуация совершенно иная: ИТ бюджет – один из наиболее важных для предприятия, потому что проблема, возникающая в области ИТ, в конечном счете, обходится гораздо дороже, чем проблема, возникающая из-за словашегося станка. Статистика показывает, что предприятия, которые 3–4 года назад инвестировали в ИТ-решения, сегодня находятся на совершенно другом уровне развития по сравнению с остальными.

При отсутствии автоматизации производства, ошибки чаще всего происходят на этапе опытного проектирования или изготовления лабораторного макета, либо первой партии изделия. Стоимость устранения таких ошибок достаточно велика. Современные САПР позволяют моделировать работу изделия, совершенствовать конструкцию, а также находить и исправлять ошибки ещё до воплощения результатов разработки в конкретном изделии. Таким образом, разработчик может снизить или сократить как временные, так и денежные затраты на изготовление опытного образца за счет симуляции или моделирования работы прибора. Стоимость изготовления физических макетов и стоимость проведения испытаний – достаточно большая статья расходов.

При применении систем автоматизированного проектирования разработчик может увидеть результат своего труда на экране монитора, что при грамотном использовании продукта может исключить появление определенного ряда ошибок. Однако САПР не заменяет процесс создания макета и опытных образцов изделия, а лишь облегчает его, т. е. дает поведенческое описание работы разрабатываемого прибора или устройства.

Применение САПР позволяет не только сократить количество ошибок, но и предотвратить их повторное возникновение. Процесс внесения изменений на каждом предприятии прописан по-разному и может быть тем сложнее, чем сложнее изделие и больше предприятие или его структурная единица. Как правило, необходимо уведомить об изменении большое количество людей из различных структурных подразделений, в том числе и представителя заказчика. САПР справляется с подобной задачей за счет единого источника данных. Если в разработку вносится изменение, то о нем оповещаются сразу все участники процесса, т. к. работа всегда ведется с последней из имеющихся версий проекта. В тоже время, предыдущая версия автоматически перемещается в архив, что позволяет восстановить проект, в случае внесения неверного изменения.

В полной мере преимущества от использования САПР могут быть использованы на предприятиях занятых в оборонной промышленности. Грамотное применение современных САПР позволит осуществить переход предприятий оборонного комплекса на новый, качественный уровень.

Типовой порядок ведения разработки систем и приборов специального назначения схематически представлен на рис. 1.

Применение современных средств информационных технологий позволяет ускорить процесс разработки и избежать потенциальных ошибок на различных этапах разработки, отработки и испытаний приборов и систем.

На рис. 2 представлена внутренняя иерархическая структура и порядок внутреннего взаимодействия, разработанного авторами программно-аппаратного комплекса.

Для оптимизации процесса разработки авторами предложено использовать программный пакет LabVIEW [1, 2] совместно со средством сквозного автоматизированного проектирования Altium Designer [3, 4, 5, 6].

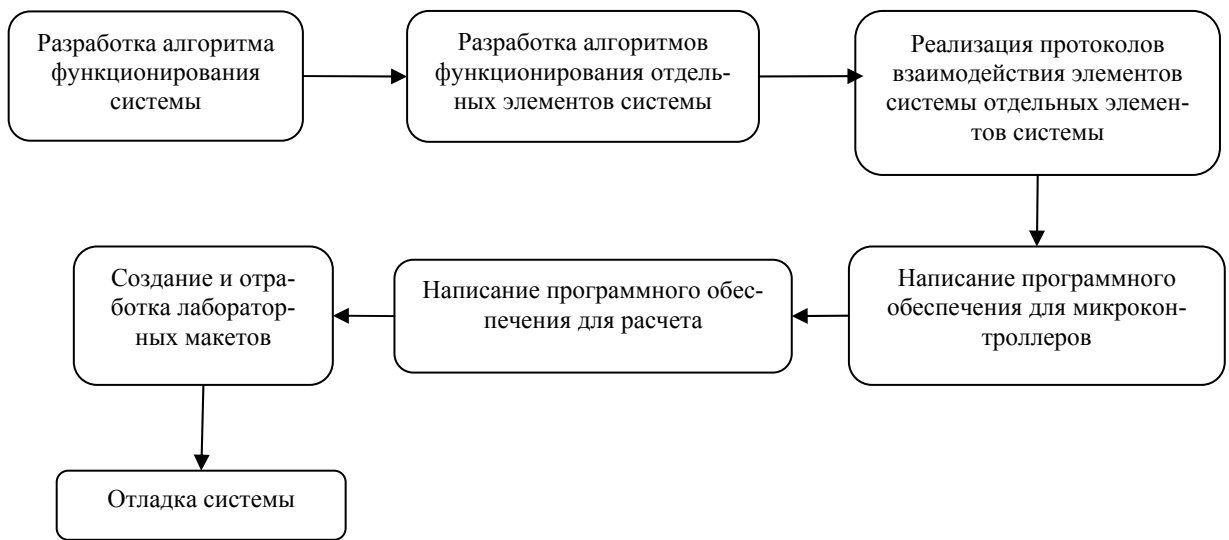


Рис. 1. Порядок ведения разработки приборов специального назначения

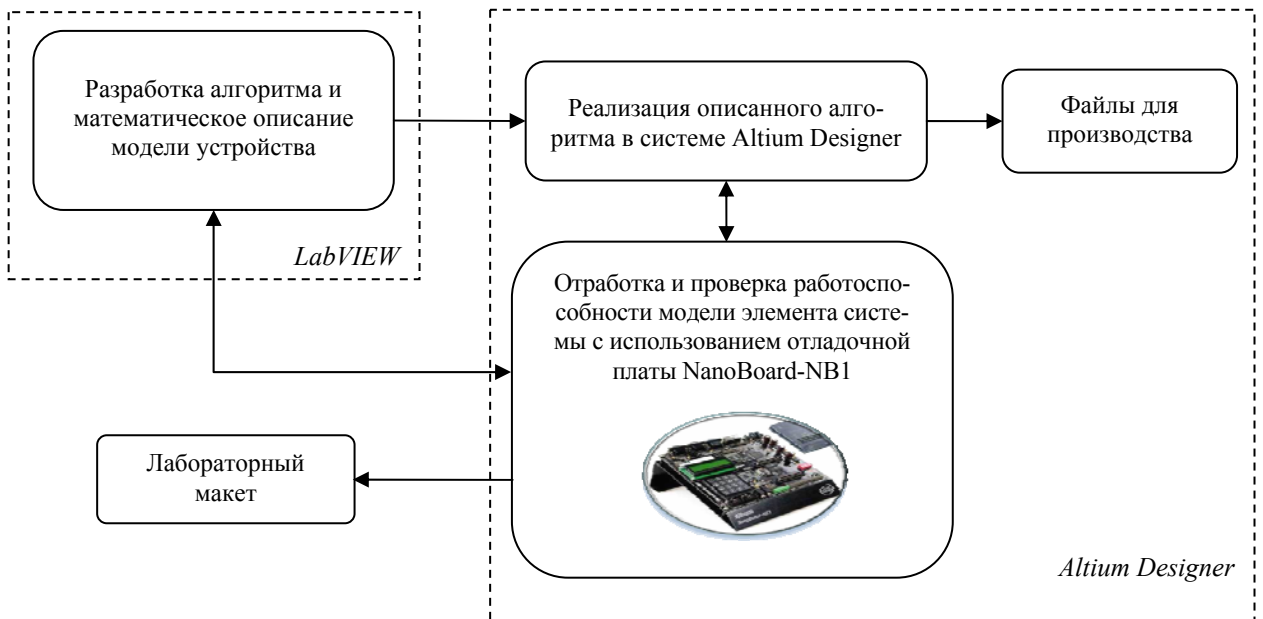


Рис. 2. Внутренняя иерархическая структура и порядок внутреннего взаимодействия элементов программно-аппаратного комплекса

В LabVIEW применяется мощный и гибкий графический язык программирования, позволяющий значительно увеличить производительность труда и идеально подходящий для учёных и инженеров, для которых программирование является лишь частью работы. Для освоения этого языка не требуется много времени, при создании проектов затрачивается значительно меньше времени и усилий по сравнению с написанием традиционного программного кода.

На рис. 3 представлен пример общего вида системы, состоящей из трех виртуальных приборов, два из которых идентичны (обозначены П2). Модель каждого прибора выполнена в виде подпрограммы, способной функционировать как самостоятельно, так и в составе системы.

Модель системы позволяет задавать входные данные и режимы работы, производить сбор и экспорт выходных данных, а также мониторинг промежуточных данных в реальном времени.

Рис. 4 иллюстрирует наглядность представления данных, циркулирующих в разрабатываемой системе в панели управления проектом.

При разработке программного обеспечения для микроконтроллеров, входящих в состав приборов, разработчик первоначально производит моделирование приборов в LabVIEW. При этом возможно наглядно выделить подпрограммы и произвести оптимизацию алгоритмов.

После этого алгоритм реализуется в системе автоматизированного проектирования Altium Designer

с использованием отладочной платы NanoBoard-NB1 (рис. 5). Таким образом, у разработчиков упрощается процедура написания программного кода и воплощения реальных приборов в «железе», также появляется возможность пошаговой верификации и реализации проекта посредством постоянной, в том числе и автоматической верификации проекта в системе Altium Designer.

В системе Altium Designer существует возможность введения проекта в графическом (схемном)

виде (рис. 6), которая позволяет полностью отказаться от использования и знания HDL-языков. Обширный перечень поставляемых ПЛИС-ориентированных устройств позволяет быстро и просто «строить» проектируемую систему. Пользовательские компоненты и вспомогательные логические блоки могут быть созданы на основе уже существующих блоков, представленных в виде все той же схемы или при помощи описания на языке VHDL (рис. 7). При необходимости пользователь может воспользоваться

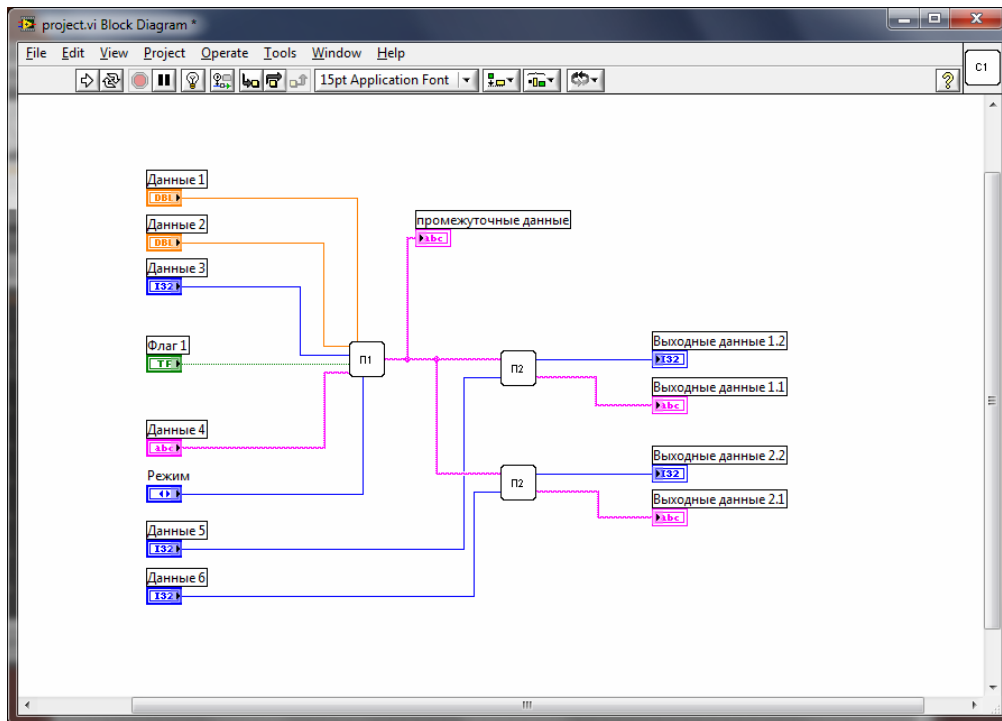


Рис. 3. Блок-схема разрабатываемой системы

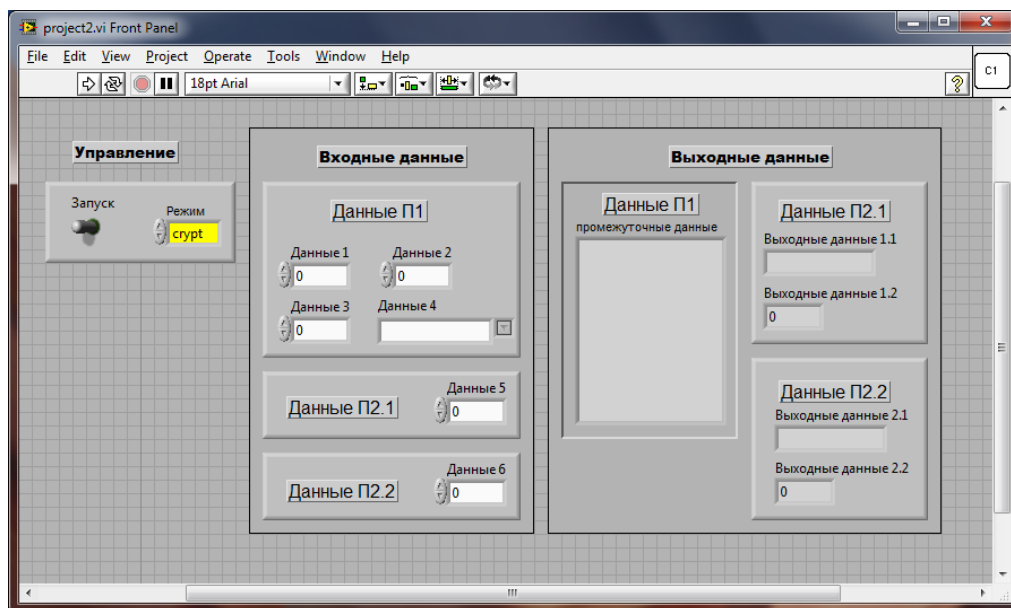


Рис. 4. Панель управления проектом



Рис. 5. Внешний вид NanoBoard-NB1

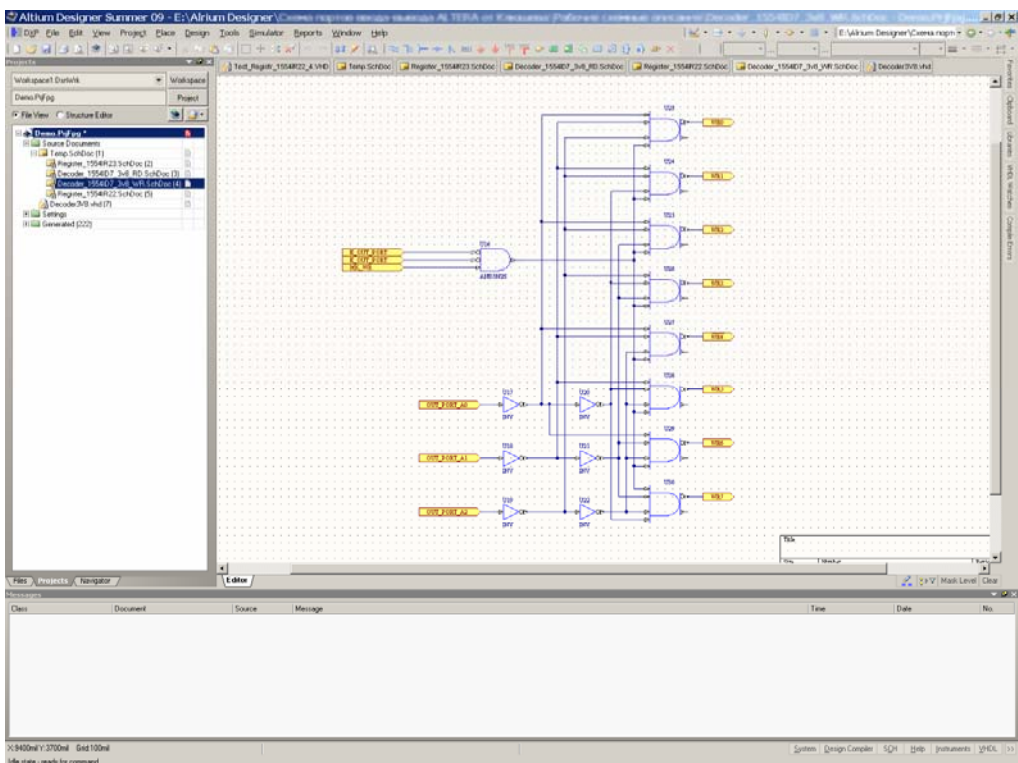


Рис. 6. Схемное описание на элементарной логике

многоканальными структурами (многократное использование единожды описанного фрагмента). А возможность использовать шинные соединения при работе с мультывыводами значительно упрощает ввод проекта.

При создании программного обеспечения для расчета входных данных системы специального на-

значения разработчик способен в сжатые сроки создать проект программы в LabVIEW и произвести его отработку совместно с моделью системы описанной в Altium Designer. Отлаженный в LabVIEW проект программы является исходными данными для разработки программного обеспечения и моделирования поведения реального прибора в Altium Designer.



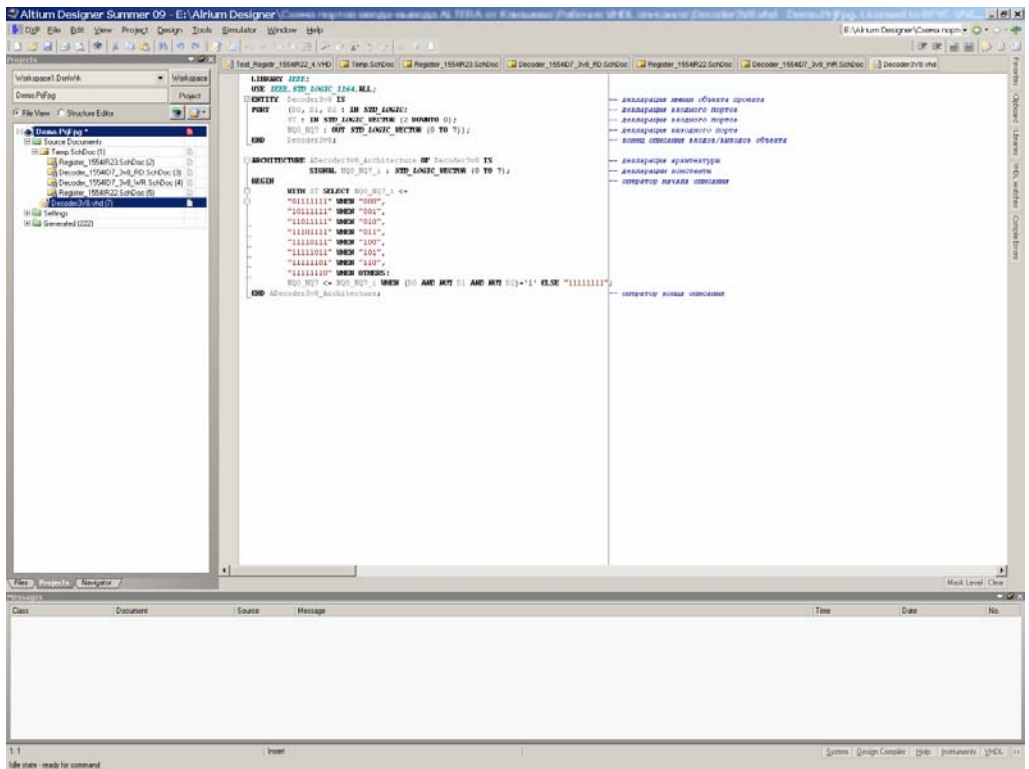


Рис. 7. VHDL описание элемента, представленного на рис. 4

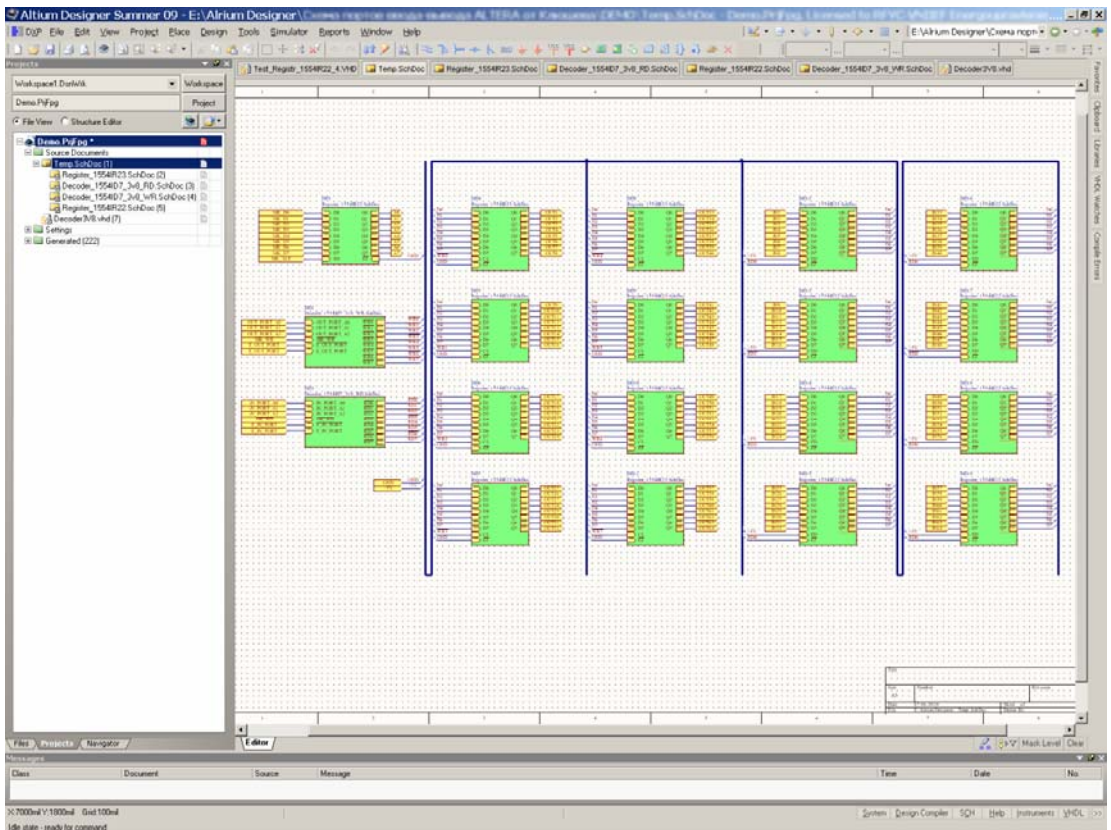


Рис. 8. Схемное описание собранного проекта

Внешний вид собранного и верифицированного проекта представлен на рис. 8, проект описан в графическом виде.

Описанный подход меняет представление о стандартных методах проектирования приборов и устройств. В традиционных системах, связь между

виртуальными приборами и физическими элементами системы часто осуществляется посредством плат сопряжения, что усложняет и делает более дорогим сам процесс проектирования. Представленный метод позволяет отказаться от устройств сопряжения, разработка ведется пошагово, каждый верифицированный блок, т. е. его математическое описание быстро воплощается в «железе» через NanoBoard-NB1, которое в дальнейшем служит своеобразным предварительным верификатором следующего математически описанного алгоритма.

Использование системы разработанной авторам позволяет осуществлять параллельное документирование процесса обмена между приборами и вести конструкторскую документацию проекта.

При параллельном создании разными разработчиками приборов специального назначения, входящих в одну систему, такой подход позволяет избежать множества ошибок при работе приборов в составе системы и существенно сократить время на их отладку.

Созданный авторами программно-аппаратный комплекс позволяет существенно ускорить, удешевить и облегчить процесс разработки систем и приборов специального назначения.

На данный момент комплекс проходит проверку в тестовом режиме, создаются библиотеки описаний

блоков и узлов, которые в дальнейшем планируется использовать в одной из ОКР.

## Литература

1. Евдокимов Ю. К., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. М.: ДМК Пресс, 2007.
2. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005.
3. Altium Designer Schematic Capture and PCB Editing training, 2006 – Altium Limited.
4. Getting started with Altium Designer, version 1.0, 29 apr. 2005. – Altium Limited.
5. Сабунин А. Е. Статьи о работе в Altium Designer (Protel). «Современная электроника» № 6, 2007, № 5–9, 2008, № 1–4, 2009.
6. Потапов Ю. В. Система проектирования печатных плат Protel. М.: Горячая линия-Телеком, 2003.

## КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК НАУЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

*А. В. Маркелова, М. Ю. Тышкевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В РФЯЦ-ВНИИТФ имеется большой задел научно-технических разработок, коллектив высококвалифицированных специалистов и развитая материально-техническая база.

Коммерциализация значительного потенциала РФЯЦ-ВНИИТФ становится в настоящее время насущной задачей. Очевидно, что часть ранее выполненных разработок при некоторой модернизации и должной маркетинговой политике могут стать востребованным на рынке товаром.

Ранее коммерческое внедрение разработок РФЯЦ-ВНИИТФ соответствовало основным правилам маркетинга большей частью благодаря тому, что логика маркетинга была заложена в системе управления предприятием еще в СССР, а также «интуитивному» маркетингу прогрессивных специалистов и руководителей. Конечно, маркетинг был «стихийный», не имел системного характера и большей частью был ориентирован на решение технических, а не коммерческих задач.

На сегодня становится актуальным организация маркетинговой структуры для продвижения разработок и продукции на рынке. В разработке маркетинговой структуры предприятий Росатома необходимо участие специалистов как Госкорпорации, так и родственных предприятий. На таком же уровне должна выработываться и маркетинговая политика.

Для функционирования маркетинговой структуры необходимы:

- разработка маркетинговой политики;
- формирование маркетинговой информационной системы;
- привлечение квалифицированных специалистов;
- создание методического, программного и технического обеспечения.

Сегодня РФЯЦ-ВНИИТФ находится на начальном этапе формирования маркетинговой информационной системы (МИС). В состав такой системы должны входить организационные, технические и программные средства для сбора, сортировки, анализа, оценки и распределения необходимой, своевременной и точной информации, предназначенной для лиц, принимающих решения в области маркетинга. Задача МИС состоит в отборе информации, важной для контроля над маркетинговой деятельностью, и обеспечении связи с рынком.

В состав планируемой маркетинговой информационной системы должны входить:

- подсистема внутренней отчетности, отражающая показатели текущего сбыта, издержки, данные о текущем состоянии производства и разработок, объемы материальных запасов;
- подсистема сбора внешней текущей маркетинговой информации, поставляющая оперативную информацию о состоянии рынков («стратегическая маркетинговая разведка»);
- подсистема маркетинговых исследований, призванная обеспечить сбор информации, актуальной с точки зрения конкретной маркетинговой проблемы («тактическая маркетинговая разведка»);
- подсистема анализа маркетинговой информации, использующая современные информационные технологии сбора данных, их анализа, прогнозирования и моделирования.

Основная цель внедрения МИС – обеспечение беспрепятственной циркуляции маркетинговой информации между всеми заинтересованными структурами.

Развитие информационных и компьютерных технологий качественно изменило характер маркетинговой деятельности. Возникло понятие виртуального маркетинга, который мы планируем использовать, как основной инструмент нашей работы. К виртуальному маркетингу мы относим не только исследования внешней среды, но и электронные средства продвижения продукции. Сложно представить сегодня обращение какой-либо информации без использования Internet, поэтому большое значение мы придаем работе в этой сети. В основном это:

- поиск информации о состоянии и тенденциях рынка (научно-технический прогноз, сегментация рынка, объемы рынков, темпы роста сегментов, приоритетное финансирование);
- определение и анализ конкурентов (прямых, косвенных, патентные ограничения);
- поиск поставщиков и потенциальных потребителей;
- поиск инвесторов и заказчиков (в т. ч. мониторинг федеральных программ, конкурсов, тендеров, присутствие на электронных торговых площадках, участие в специализированных торговых форумах и т. п.);

- определение необходимых сертификатов и лицензий;
- создание и поддержание веб-сайта.

Преимущества виртуального маркетинга:

- отсутствие пространственной локализации, возможность осуществлять деятельность вне привязки к конкретной территории или локальному рынку;
- обеспечение возможности сокращения времени на поиск партнеров, инвесторов и т. д.;
- снижение издержек, в том числе накладных и командировочных расходов;
- сокращения времени на разработку и внедрение новой продукции, обоснование ценообразования, снижения числа посредников и затрат на сбыт и т. д.

На сегодня информация, представленная в Internet, носит достаточно обобщенный характер и рассчитана на «среднестатистического» пользователя, ее достоверность неизвестна, необходимо учитывать особенности российского рынка – значительный по объему нелегальный сектор экономики, преобладание наличных расчетов, неформальный характер формирования взаимоотношений между партнерами по бизнесу.

Кроме «виртуального» маркетинга планируется проведение следующих маркетинговых мероприятий:

- систематизация и анализ научно-технического задела разработок;
- определение производственных и кадровых ресурсов;
- защита интеллектуальной собственности разработок;
- активное участие в выставках, конференциях;
- проведение демонстрационных, учебных семинаров и презентаций;
- организация системы работы со СМИ, публикаций в научно-технических изданиях;
- получение необходимых сертификатов и лицензий;
- разработка и рассылка коммерческих предложений.

Перспективными направлениями разработок для коммерциализации представляются работы в области энергоучета и энергосбережения и гидроструйные технологии.

Обладая большим опытом разработки, монтажа и эксплуатации больших информационно-измерительных и управляющих систем для полигонных испыта-

ний, в институте начаты работы по разработке и внедрению систем управления и учета энергоресурсов. Учитывая новую специфику, после анализа состояния дел в данной области нашли партнера, много лет работающего на рынке, – фирму «Систел» г. Протвино. В результате совместных работ была разработана система учета и управления энергоресурсами.

В соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ от 23.11.2009 об энергосбережении и в рамках реализации Программы энергосбережения Госкорпорации «Росатом» от 13.05.2010 разработана система учета и управления энергоресурсами. Выполнены работы по реконструкции телемеханики и системы учета электроэнергии на понижающей подстанции ГПП-4 в г. Снежинск, выполнен весь цикл работ: предпроектное обследование, выпуск и согласование проектной документации, монтаж, пуско-наладочные работы.

Осуществлены совместные с фирмой «Систел» работы по подключению аналогичной системы на Сибирском химическом комбинате.

В РФЯЦ-ВНИИТФ разработано и успешно эксплуатируется гидрорезное оборудование высокого давления. На основе применения этого оборудования разработаны технологии, нашедшие применение в задачах утилизации вооружения и военной техники, в машиностроении, строительстве, коммунальном хозяйстве, судоремонте и ядерной энергетике. Гидрорезное оборудование РФЯЦ-ВНИИТФ было поставлено на несколько российских предприятий.

Одна из перспективных сфер применения гидроструйных технологий – это демонтаж и дезактивация в ядерной энергетике. В этой части мы еще только начинаем работать, но заинтересованность в применении водоструйных технологий уже проявили ведущие российские предприятия: ПО «Маяк» (г. Озерск), ГХК (г. Железногорск), ЧМЗ (г. Глазов), БАЭС (г. Заречный), РИЦ «Курчатовский институт» (Москва), ОАО «ЦС «Звездочка» (г. Северодвинск), КуАЭС (г. Курчатов) и др.

В настоящее время российский рынок насыщается импортным гидрорезным оборудованием и направленность гидроструйных разработок РФЯЦ-ВНИИТФ смещается в область оказания услуг или разработки новых технологических приложений оборудования.

Проведение маркетинговых исследований стало реальной потребностью и прочно вошло в практику хозяйственной деятельности. Это – необходимое условие повышения нашей конкурентоспособности и коммерциализации разработок РФЯЦ-ВНИИТФ.

# АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В GSM СЕТЯХ

А. Н. Моксяков, Е. П. Погодин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Необходимо признать, что жизнь в современном мире невозможна без использования продуктов технического прогресса. Автомобили, компьютеры, сотовые телефоны и многое другое все – это все то, без чего не представляется настоящее и без чего не видится будущее, поэтому безопасности продукта используемого миллионами людей уделяется особое внимание.

Цель данной исследовательской работы – рассмотрение стойкости криптографических алгоритмов в GSM сетях, на основе которых построена конфиденциальность разговора по мобильному телефону.

Безопасность в GSM сети организована с помощью трех криптографических алгоритмов: A3 – алгоритм аутентификации абонента, используется в большинстве сетей; A5 – поточный алгоритм шифрования речи, имеет несколько спецификаций в зависимости от географического расположения абонента; A8 – алгоритм выработки сессионного ключа, который участвует в алгоритм шифрования речи.

Модель безопасности и алгоритмы шифрования разрабатывались в тайне и никогда не были опубликованы. Со временем некоторые алгоритмы и спецификации стали доступны. Алгоритмы изучили, и были найдены критические ошибки. Таким образом, при более детальном рассмотрении стандарта GSM видно, что его модель безопасности не совсем эффективна. Из возможных атак на GSM сеть следует выделить несколько самых популярных:

1. Лобовая атака A5 в реальном времени невозможна, так как требует относительно больших аппаратных мощностей и составляет 250 часов для Pentium III с тактовой частотой в 600 МГц.

2. «Разделяй и властвуй» основана на известной атаке открытого текста. Атакующий пытается определить начальные состояния регистров сдвига из известной последовательности гаммы. Атакующий должен знать 64 последовательные бита гаммы, которые можно извлечь, если атакующий знает какой-либо текст шифра и соответствующий открытый текст. Это в большой степени зависит от формата GSM кадров, посылаемых туда и обратно. Кадры GSM содержат большое количество постоянной информации, например, заголовки кадров. Требуемые 64 бита не всегда могут быть получены, но 32 или 48 бит, иногда и больше, обычно известны. Атакующему необходимо только сегмент из 64 битов открытого текста.

3. Доступ к сигнальной сети оператора позволяет слушать все передачи, так как за пределами базовой станции в сети оператора трафик передается открытым текстом.

4. Извлечение ключа из SIM карты в эфире основана на следующем. Требуется, чтобы мобильный телефон откликалась на каждый вызов сети GSM. Если мощность законного сигнала базовой станции превышена нестандартной базовой станцией злоумышленника, злоумышленник может бомбардировать вызовами мобильный телефон и реконструировать секретный ключ по откликам. Мобильный телефон должен быть доступен злоумышленнику в эфире все время, необходимое для атаки. Неизвестно, сколько времени продлится атака в эфире предположительно от 8 до 13 часов.

5. Существует вероятность взлома алгоритма A8, так как кто-либо может без особых усилий взломать алгоритм генерации ключа A8 и извлечь секретный ключ,  $K_i$ , основанный на случайном вызове, RAND, сеансовом ключе,  $K_c$ , и отклике SRES (предполагается, что один и тот же алгоритм используется в A3 и A8, как в случае с COMP128). Например, злоумышленник может найти RAND, который производит в результате  $K_i$  (самый легкий пример). Все три переменные относительно просто найти. RAND и SRES отсылаются по эфиру открытым текстом. Сеансовый ключ  $K_c$  можно относительно легко при наличии достаточного количества времени вычлечь из зашифрованных кадров и известного открытого текста. Уязвимость такого рода в алгоритме генерации ключа, конечно, разрушит всю систему безопасности GSM и даст Консорциуму GSM повод для размышления, когда они будут изобретать свои следующие алгоритмы безопасности.

6. Извлечение ключа из SIM самая дерзкая атака из всех, так как если скомпрометировать секретный ключ  $K_i$ , то появляется возможность прослушивать звонки абонентов и переадресовывать счета за звонки на счет других абонентов.

Из представленных атак нас заинтересовала последняя, ввиду наличия подходящего оборудования и небольшого накопленного опыта по прошлым работам. Как было сказано чуть ранее, атака основана на извлечении идентификационного ключа, который хранится в памяти SIM карты и к которому исключен прямой доступ.  $K_i$  необходим для выработки сессионного ключа и ответа подтверждающего результат либо подписанные отклики. Самым важным звеном в цепочке защиты является алгоритм A5.

В этом алгоритме каждому символу открытого текста соответствует символ шифротекста. Текст не делится на блоки (как в блочном шифровании) и не изменяется в размере. Для упрощения аппарат-

ной реализации и, следовательно, увеличения быстроедействия используются только простейшие операции: сложение по модулю 2 (XOR) и сдвиг реестра.

Формирование выходной последовательности происходит путём сложения потока исходного текста с генерируемой последовательностью (гаммой). Особенность операции XOR заключается в том, что применённая чётное число раз, она приводит к начальному значению. Отсюда, декодирование сообщения происходит путём сложения шифротекста с известной последовательностью.

Таким образом, безопасность системы полностью зависит от свойств последовательности. В идеальном случае каждый бит гаммы – это независимая случайная величина, и сама последовательность является случайной. Такая схема была изобретена Вернамом в 1917 году и названа в его честь. Как доказал Клод Шеннон в 1949 году, это обеспечивает абсолютную криптостойкость. Но использование случайной последовательности означает передачу по защищённому каналу сообщения равного по объёму открытому тексту, что значительно усложняет задачу и практически нигде не используется.

В реальных системах создаётся ключ заданного размера, который без труда передаётся по закрытому каналу. Последовательность генерируется на его ос-

нове и является псевдослучайной. Большой класс поточных шифров (в том числе A5) составляют шифры, генератор псевдослучайной последовательности которой основан на регистрах сдвига с линейной обратной связью.

Алгоритм A5 был подвергнут корреляционно-му анализу, который позволяет узнать ключ путем использования информации о заполнении трех или четырех регистров сдвига. Со своей стороны мы прорабатываем этот вариант и работаем над симулятором SIM карты на основе PIC процессора, что в дальнейшем при положительных результатах при вычислении  $K_i$  позволит копировать SIM карты.

## Литература

1. Haverinen H., Salowey J. Extensible Authentication Protocol Method for Global System for Mobile Communications (GSM) and Subscriber Identity Modules (EAP-SIM), 1994.
2. Anderson, Ross A5 – The GSM Encryption Algorithm, 1996.
3. Шнайнер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке СИ. М: ТРИУМФ, 2003.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРКИ. СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПОВЕРКЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ В ПОЛУАВТОМАТИЗИРОВАННОМ РЕЖИМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАЛИБРАТОРА Fluke 9100

*И. А. Надежкина, В. К. Дарымов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Большой объем метрологических работ делает актуальным вопрос повышения производительности труда. А возрастающие требования к точности и быстрой реакции средств измерений вызывают необходимость автоматизации процесса измерений при проведении поверки с использованием средств вычислительной техники и унифицированных электронных комплексов.

Под автоматизацией поверки следует понимать не автоматизацию в целом, а автоматизацию определенных операций или отдельных процедур. Общими операциями поверки являются внешний осмотр, опробование и определение основных метрологических характеристик средств измерений. Первые две операции трудно поддаются автоматизации, третья операция, отражающая реальные метрологические характеристики поверяемого средства измерений, вполне доступна для автоматизации поверочных работ. В процессе проведения автоматизации последней операции следует произвести некоторую последовательность действий:

- подключение поверяемого средства к поверочному оборудованию;
- подача на вход поверяемого средства измерений тестового сигнала;
- фиксация показаний поверяемого средства измерений;
- обработка результатов измерений;
- установление факта пригодности или непригодности поверяемого средства измерений;
- выдача документа с результатами поверки и заключением.

## **Преимущества автоматизации процесса поверки**

Автоматизация процесса поверки обуславливает:

- возможность реализации всех требований стандартов к поверяемым параметрам;
- снижение или полное исключение «человеческого фактора» при поверке средств измерений (СИ);

- повышение достоверности измерений;
- возможность увеличения экономической эффективности за счет снижения времени на поверку одного прибора.

Автоматическая регистрация результатов измерений при поверке обеспечивает «прозрачность» этого процесса, заключающуюся как в возможности в любой момент обратиться к архиву данных и извлечь необходимую информацию, так и в учете количества СИ, представленных на поверку и (или) успешно прошедших ее.

Большой парк СИ во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и, как следствие, значительный объем поверочных работ делают актуальной задачу создания программно-аппаратного комплекса.

Программно-аппаратный комплекс позволяет получить качественно новый уровень поверки, но в то же время он должен быть ориентирован на пользователя, не являющегося профессионалом в области вычислительной техники, и обеспечивать для оператора простой и удобный режим работы.

Программная автоматизация повышает достоверность результатов тестирования, уменьшает количество ошибок и сокращает время на поверку измерительного прибора. Также обеспечиваются хранение и поиск информации.

Применение процедур поверки гарантирует то, что с их помощью будет надлежащим образом выполнена требуемая последовательность операций в соответствии с техническими требованиями производителей оборудования или утвержденной методикой поверки.

Уровень автоматизации поверки можно определять отношением объема операций (время, затрачиваемое на выполнение этой операции), выполняемых автоматически, к общему объему операций поверки. В автоматизированных устройствах поверки это отношение не менее 50 %.

При автоматизации поверки СИ в первую очередь автоматизируются обработка измерительной информации и выдача документа о поверяемых СИ, что составляет не менее 50 % от общего объема операций поверки.



## Выбор направления в автоматизации поверки

В метрологической службе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» поверка является одним из основных видов деятельности. Наличие аппаратных средств в области электрических измерений, поддерживающих программное управление, позволяет автоматизировать поверку универсальных цифровых вольтметров.

На основе анализа базы данных на поверяемые СИ было установлено, что на данный момент во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» используется большое количество универсальных цифровых вольтметров, не имеющих порт IEEE-488 для подключения прибора непосредственно к компьютеру, в связи с этим актуальна проблема поверки вольтметров в полуавтоматизированном режиме, при непосредственном участии человека.

### Средства автоматизации процесса поверки

Средства автоматизации процесса поверки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Средства автоматизации процесса поверки: а – метрологическое программное обеспечение Fluke MET/CAL Plus; б – канал общего пользования IEEE-488; в – многофункциональный калибратор Fluke 9100

Программное обеспечение FLUKE MET/CAL Plus [1] – это набор функционирующих в среде Windows приложений, которые автоматизируют процесс поверки средств измерений и управление им. Сюда входят выполнение процедуры, инструментальный контроль, хранение результатов, составление отчетов и администрирование средств измерений. Данное программное обеспечение позволяет

пользователю управлять поверочным оборудованием и средствами измерений через шину IEEE-488 или последовательный порт RS-232.

Многофункциональный калибратор Fluke 9100 – это рабочий эталон, обладающий всем необходимым набором функций для поверки мультиметров и идеально подходящий по всем параметрам.

В состав средств автоматизации процесса поверки входит также персональный компьютер с принтером.

### Последовательность технологических операций при поверке

Метрологическое программное обеспечение FLUKE MET/CAL Plus – это эффективный инструмент автоматизации. Гибкая система настроек позволяет лучше соответствовать конкретным производственным нормам в отношении последовательности технологических операций и документирования. Программа разработана на основе типичного пути, который проходит прибор при его поступлении, ремонте, техническом обслуживании или поверке и, наконец, отсылке обратно к месту своей эксплуатации. Поскольку в различных организациях данный процесс может протекать по-разному, предусмотрены средства индивидуальной настройки.

Ниже описывается путь, по которому проходит СИ в процессе поверки [2]. Процесс представлен в виде диаграммы на рис. 2.

1. Поступление поверяемого СИ.

2. Ввод данных в реестр. Важная информация (например, индивидуальный номер СИ) заносится в конфигурационную форму. Помимо данных идентификации эта информация будет включать в себя статус (или состояние) СИ в момент поступления и межповерочный интервал (см. рис. 3). В результате создается учетная запись по поверяемому СИ.

3. Средство измерений поверяют. Результаты поверки регистрируются в базе данных автоматически. В конце процедуры автоматической поверки оператору может быть предложено сохранить данные и распечатать протокол поверки (см. рис. 4).

4. При несоответствии результатов поверки требованиям нормативных документов поверяемое СИ к дальнейшей эксплуатации не допускают и выдают извещение о непригодности в соответствии с ПР 50.2.006-94. В извещении указывают причину непригодности и приводят указание о направлении поверяемого СИ в ремонт или о невозможности его дальнейшего использования. Если поверяемое СИ полностью соответствует требованиям нормативных документов, выдают свидетельство о поверке.

5. После окончания работ прибор отправляют пользователю.

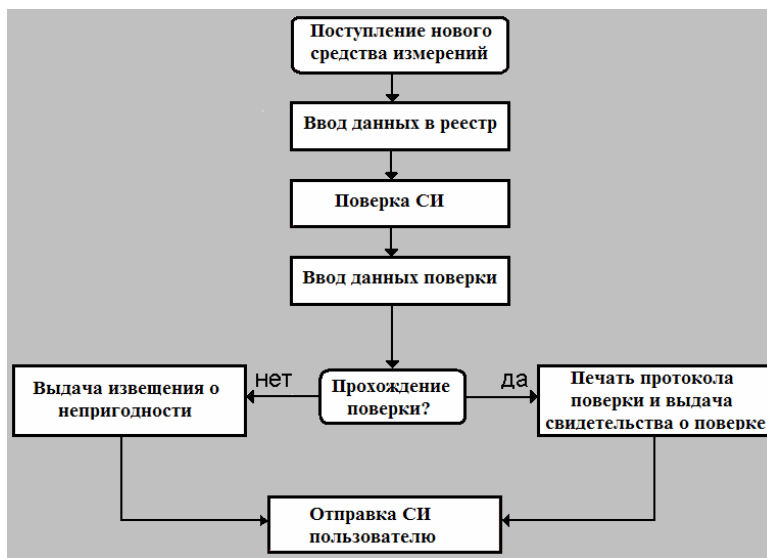


Рис. 2. Последовательность технологических операций

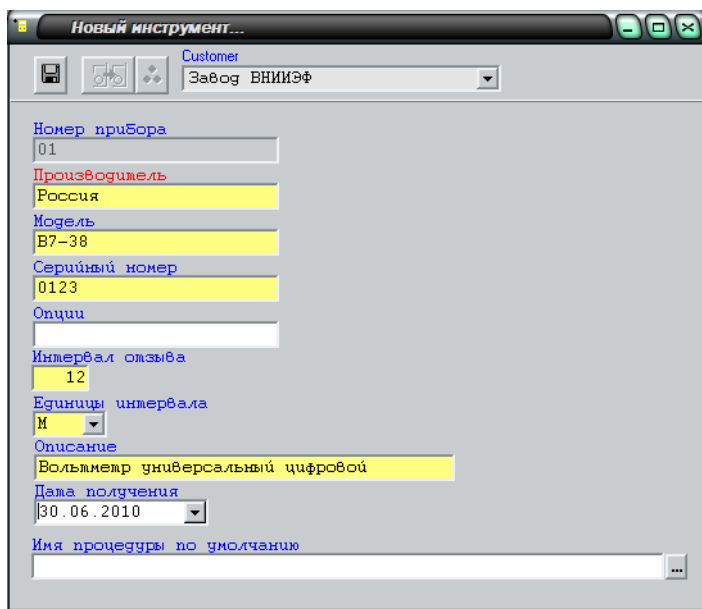


Рис. 3. Ввод данных в реестр

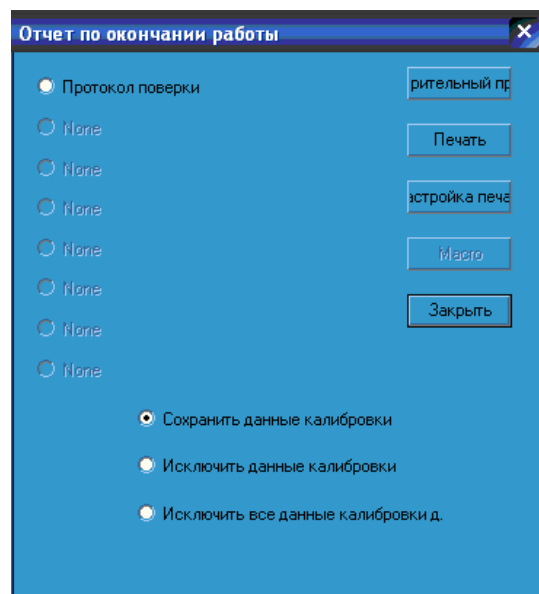


Рис. 4. Информационное окно

### Разработка ПО для программно-аппаратного комплекса по поверке универсальных цифровых вольтметров в полуавтоматизированном режиме с применением калибратора Fluke 9100

В метрологической службе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» создан и успешно опробован комплекс по поверке универсальных цифровых вольтметров в полуавтоматизированном режиме на базе персонального компьютера с применением программного обеспечения Fluke MET/CAL Plus.

Комплекс по поверке универсальных цифровых вольтметров включает в себя:

- персональный компьютер с установленной платой PCI-GPIB;

- программное обеспечение FLUKE MET/CAL Plus;
- калибратор универсальный FLUKE 9100;
- принтер.

Схема автоматизированного рабочего места представлена на рис. 5.

Для проведения полуавтоматизированной поверки разработаны процедуры в соответствии с методиками поверки на вольтметры B7-22А и B7-38 [3, 4].

В процессе выполнения процедур автоматически выводятся на экран монитора сообщения о подключениях, предлагающие пользователю присоединить тестируемое устройство к выходным зажимам 9100. Данное сообщение позволяет исключить ошибки при выборе схемы подключения приборов и дает указания о выборе режимов работы (см. рис. 6).

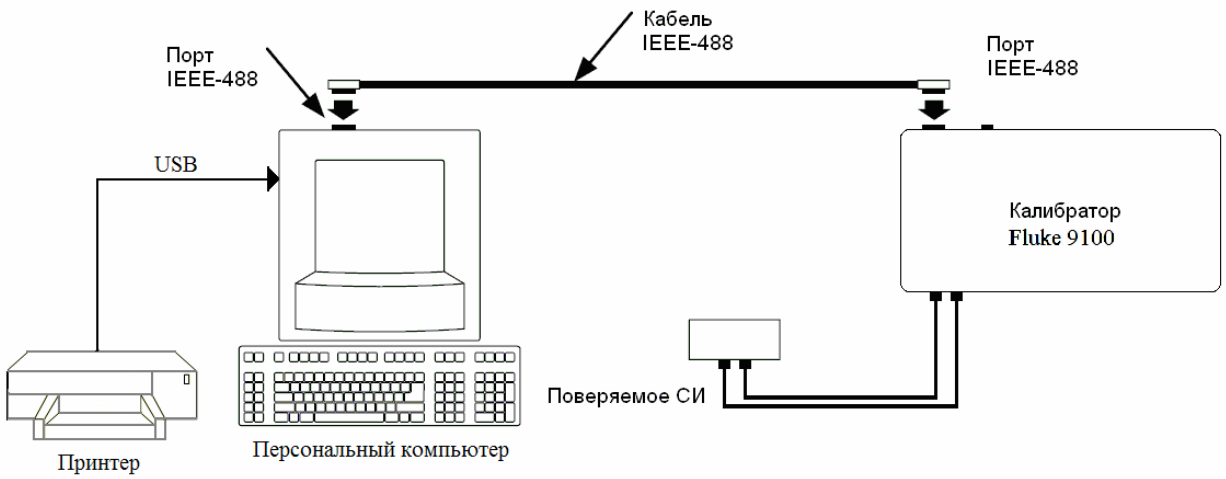


Рис. 5. Схема автоматизированного рабочего места

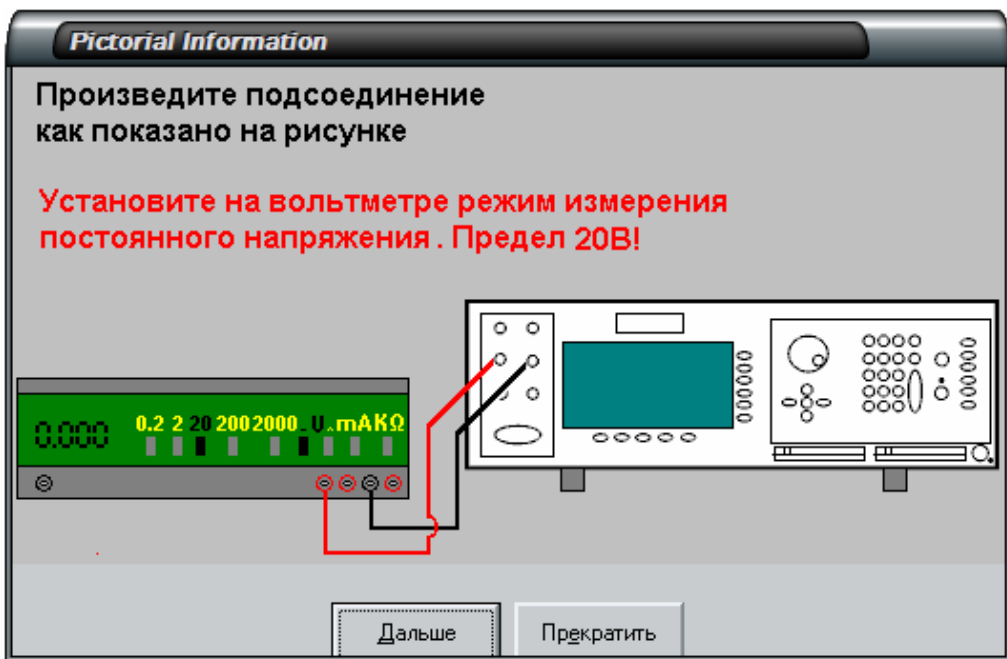


Рис. 6. Схема подключения поверяемого вольтметра к калибратору Fluke 9100

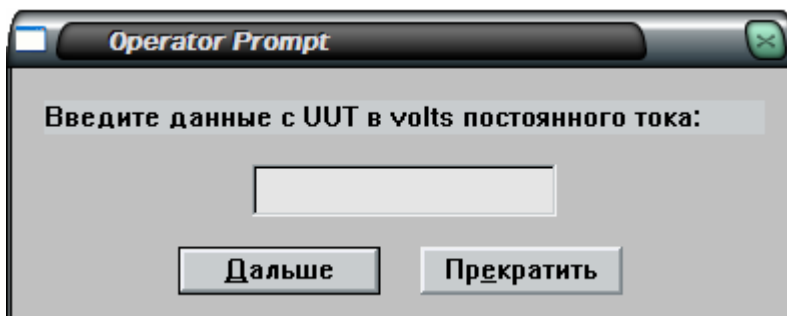


Рис. 7. Сообщение о вводе данных с дисплея вольтметра

Калибратор программируется на воспроизведение напряжения постоянного тока с внутренним контролем, при этом на монитор компьютера выводится диалоговое окно (см. рис. 7), в котором пользователю предлагается ввести показания, отображаемые на индикаторном табло поверяемого СИ.

После ввода показаний происходит автоматическая оценка результата измерений. Показания поверяемого СИ сравниваются с системным воздействием согласно спецификации поля Tolerance (Допуск). Если показания не соответствуют требованиям нормативных документов, то процедура прерывается, и дальнейшая поверка СИ прекращается. Расчет погрешностей и сохранение результатов измерений осуществляется автоматически.

В процессе отладки процедуры MET/CAL следит за тем, чтобы в процедуре выдерживалось соотношение погрешности образцового и поверяемого СИ в пределах 1:3. В случае невыполнения данного соотношения выдается сообщение о невозможности применения калибратора для поверки данного СИ. Также предусмотрены предупреждения о наличии высоких напряжений на соединительных проводах.

Вольтметры В7-22А и В7-38 имеют функциональные отличия, следовательно, процедуры поверки данных вольтметров различаются.

Вольтметр В7-38 работает только в режиме автоматического переключения пределов, в отличие от вольтметра В7-22А, у которого пределы переключаются вручную.

В момент подачи тестовых сигналов с калибратора тестовое значение изменяется скачкообразно и может произойти неправильный выбор предела измерений поверяемым СИ. Поэтому в процедуру поверки вольтметра В7-38 был добавлен цикл, для плавного установления тестовых значений калибратора [5].

1. На прибор подается напряжение значительно меньше граничного:

```
14.001 9100      1.15000V      S 2W
```

2. Задается шаг для плавного увеличения напряжения:

```
14.002 MATH      M[1] = 0.00100
```

3. Начинается цикл, в процессе выполнения которого выходное напряжение увеличивается до номинального значения:

```
14.003 LABEL      cycle2
```

```
14.004 MATH      MEM = MEM + M[1]
```

```
14.005 9100      V      S 2W
```

4. Для обеспечения плавности увеличения напряжения в цикле вводится задержка:

```
14.006 WAIT      [D50]
```

5. Цикл будет выполняться до тех пор, пока подаваемое на вольтметр значение напряжения не достигнет номинального:

```
14.007 IF      MEM<0.19900
```

```
14.008 JMPL      cycle2
```

```
14.009 ELSE
```

```
14.010 9100      0.19900V  0.000119U  2W
```

```
15.001 ENDIF
```

После завершения выполнения процедуры программа предлагает выбрать тип протокола и при необходимости распечатать. В процессе разработки был создан универсальный протокол, который можно использовать для различных типов вольтметров.

Процедуры поверки были протестированы и отлажены на автоматизированном рабочем месте и на данный момент успешно применяются при поверке вольтметров. Данные процедуры являются типовыми и могут быть использованы при разработке процедур на другие типы вольтметров.

Применение разработанного программно-аппаратного комплекса при поверке универсальных вольтметров позволило свести к минимуму вероятность внесения ошибки оператором при выборе схем подключений и режимов работы калибратора и поверяемого СИ. Разработанные процедуры гарантируют соблюдение строгой последовательности действий при определении метрологических характеристик, правильность расчетов погрешности и, как следствие, существенно повышают достоверность измерений. Автоматизация процесса поверки существенно облегчила процесс проверки метрологических характеристик и документального оформления результатов поверки, таким образом, повысилась производительность труда. Например, время, затрачиваемое на выполнение операций по определению метрологических характеристик вольтметра В7-38 и на заполнение протокола поверки, сократилось примерно на 20 %.

## Литература

1. Метрологическое программное обеспечение Fluke Metrology Software: руководство по установке и обновлению. Fluke Corporation, 1999.

2. Метрологическое программное обеспечение Fluke Metrology Software: Руководство пользователя. Fluke Corporation, 2002.

3. Вольтметр универсальный цифровой В7-38. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

4. Вольтметр универсальный цифровой В7-22А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

5. MET/CAL Metrology Software: Reference. Fluke Corporation, 1995.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*И. А. Немченко, Д. Б. Николаев, В. Б. Медведев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Целью работы является формирование концепции построения динамических алгоритмов управления на основе структурирования знаний для повышения надёжности функционирования технических систем. В понятие надёжности входят такие свойства объекта, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Отказоустойчивая система управления выявляет и компенсирует неисправные элементы и позволяет ремонтировать систему во время выполнения заданной задачи без прерывания процесса.

При разработке автоматизированной системы необходимо выбрать способ построения системы управления функционирующий в определенных условиях. К особенностям объекта управления относятся: входные данные, поступающие от внешних источников, изменяются во времени; изменяемый состав объектов и их экземпляров; неполные знания характеристик окружающей среды; нечеткие и неточные знания характеристик объекта управления; необходимость принятия решения, направленного на выбор лучшего варианта действия; возможность использования знаний опытных операторов о протекании процессов.

Классификация автоматизированных систем управления:



– управление без обратной связи: управление, при котором управляющее воздействие рассчитывается без учета результатов предыдущего управляющего воздействия;

– управление по возмущению: управляющее воздействие вырабатывается по значениям измеря-

емого возмущения (задающее воздействие в этом случае называется корректирующим);

– автономное управление: управление каждой выходной переменной объекта осуществляется независимо от других выходных переменных, для этого необходимо на каждый выход иметь свое управляющее воздействие;

– интеллектуальное управление: управляющее воздействие вырабатывается при заранее неизвестных или изменяющихся в процессе эксплуатации свойствах объекта управления.

Основные направления интеллектуальных систем управления:

- экспертные системы (ЭС);
- распознавание образов и анализ сцен;
- дедуктивные системы;
- нейрокомпьютеры;
- решатели комбинаторных задач;
- интеллектуальные роботы;
- интеллектуальный пользовательский интерфейс;
- естественно-языковые системы (анализ и синтез речи).

Для решения такого рода задач, как управление сложными динамическими объектами в общей системе управления с численными выше характеристиками характеристиками, наиболее целесообразно использовать класс автоматизированных систем – экспертные системы. Так как ЭС обладают следующими особенностями:

– алгоритм решений не известен заранее, а строится самой ЭС с помощью символических рассуждений, базирующихся на приемах;

– способность анализа и объяснения своих действий и знаний;

– способность приобретения новых знаний от пользователя-эксперта, не знающего программирования, и изменения в соответствии с ними своего поведения.

Экспертные системы используют управляющие сигналы непосредственно для приведения в действие управляющих органов (исполнительных механизмов) системы. На вычислительные средства автоматизированной системы возлагаются такие функции, как реализация различных законов регулирования, связей между отдельными контурами многосвязного регулирования, адаптивное управление. Так же экспертные системы, дают возможность не только вы-

бирать из предъявленного списка то или иное управленческое решение, но и в любой момент получить разъяснение, как и на основании каких рассуждений эти решения были получены. Т. е. оператор имеет возможность изменять установки, контролировать некоторые наиболее важные параметры, варьировать диапазоны допустимого изменения измеряемых параметров и т. д. Основным недостатком таких систем состоит в том, что при отказе АСУ оператор не всегда мог обеспечить нормальную работу системы в режиме ручного управления.

Повышение надежности системы обеспечивается и действиями человека, которые должны основываться, в первую очередь, на знании закономерностей его ошибочных действий. Они возможны на различных уровнях его деятельности, начиная от простейшей ошибочной реакции на сигнал определенного вида и кончая неверным анализом сложной обстановки и принятием ошибочного решения.

Функции оператора-технолога зависят от целей и задач, выполняемых автоматизированной системой, а также от ее функциональных, структурных и информационных особенностей. Для повышения эффективности работы оператора-технолога технические и программные средства должны обеспечивать минимальный набор информационных сообщений: индикацию измерений; индикацию и возможность измерения границ процесса; отображение значений различных констант, используемых при обработке информации; звуковую сигнализацию и индикацию отклонений от нормы контролируемых значений переменных.

Ядро экспертных систем (ЭС) являются базы знаний. ЭС выполняет функции эксперта при решении какой-либо задачи в области его компетенции.

Любая экспертная система содержит следующие модули, рис. 1:

- модуль приобретения знаний (МПЗ);
- базу знаний;
- модуль логического вывода (МЛВ);
- модуль отображения и объяснения решений (МООР).

Знания о предметной области, необходимые для работы ЭС, определенным образом формализованы и представлены в памяти ЭВМ в виде базы знаний, которая может изменяться и дополняться в процессе развития системы. Знания – это хорошо структури-

рованные данные, или данные о данных, или метаданные. База знаний – основа любой интеллектуальной системы.

К основным моделям представления знаний для экспертных систем относятся:

- логические,
- функциональные,
- производственные,
- семантические сети,
- фреймы.

Логические модели.

Модели представления знаний, в которых вычисления представляются с помощью логики предикатов

Исчисление предикатов – это формальный язык, в котором знания представляются в виде логических высказываний, которые могут иметь значения ИСТИНА, либо ЛОЖЬ.

Достоинства: универсальность.

Недостатки: предъявляет очень высокие требования и ограничения к предметной области.

Производственная модель.

Модель, основанная на правилах, позволяет представить знания в виде предложений типа: Если (условие), то (действие). Состав модели представлен на рис. 2.

Достоинства: наглядность, высокая модульность, легкость внесения дополнений и изменений, простотой механизма логического вывода.

Недостатки: ограничение на число производных, с которыми работают современные системы.

Семантические сети.

Семантическая сеть – это ориентированный граф, вершины которого – понятия, а дуги – отношения между ними. Пример семантической сети приведен на рис. 3.

Характерной особенностью семантических сетей является обязательное наличие трех типов отношений:

- класс – элемент класса,
- свойство – значение,
- пример элемента класса.

Достоинства: описание понятий и событий производится на уровне, очень близком к естественному языку;

– обеспечивается возможность сцепления различных фрагментов сети;

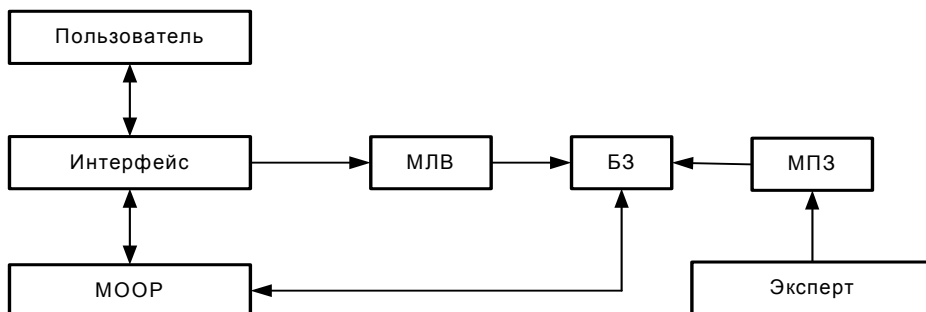


Рис. 1. Структура ЭС

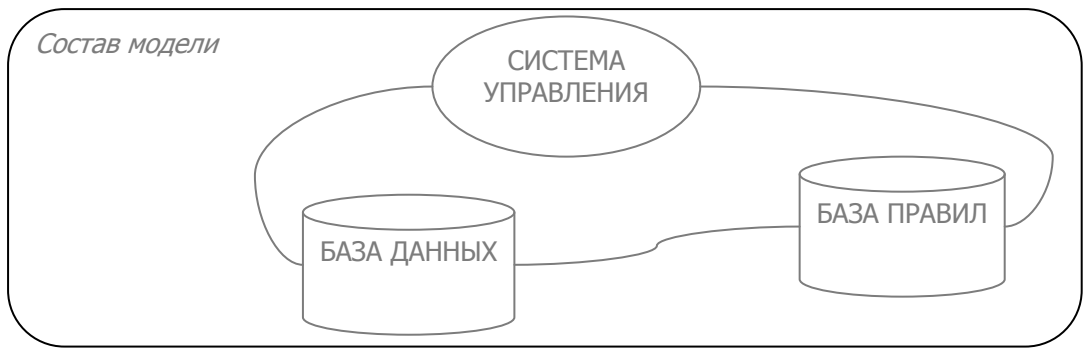


Рис. 2. Состав модели

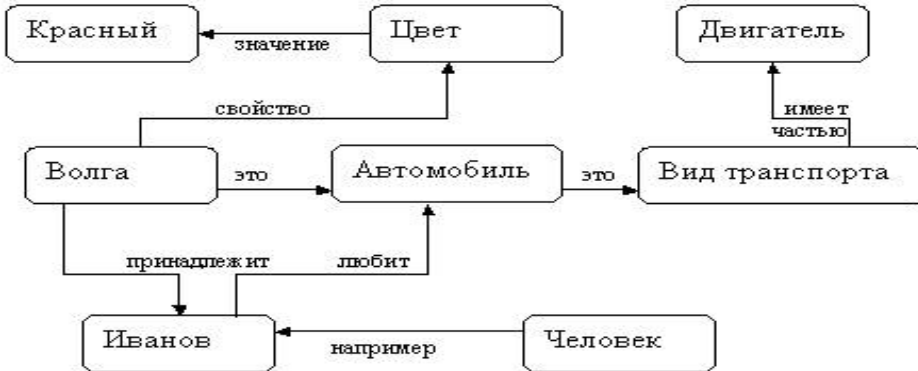


Рис. 3. Пример семантической сети

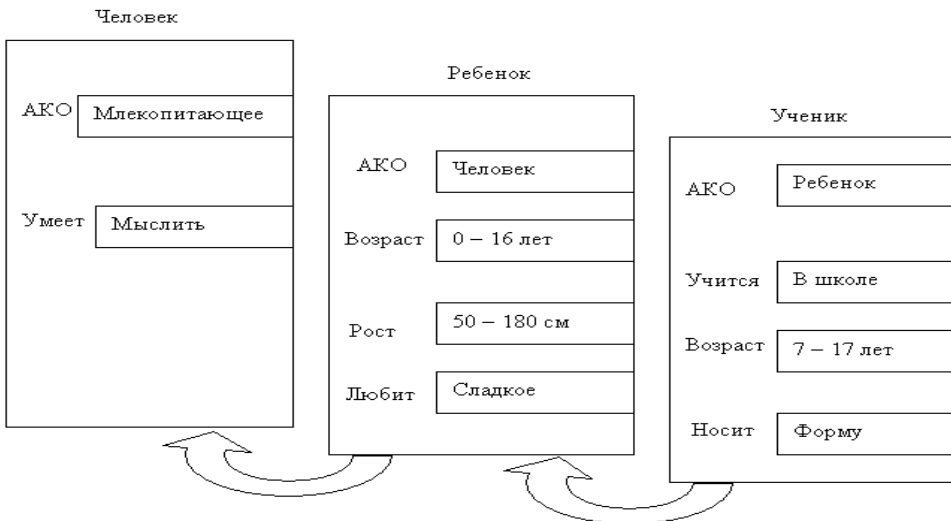


Рис. 4. Пример фрейма

– отношение между понятиями и событиями образуют достаточно небольшое и хорошо формализованное множество;

– для каждой операции над данными и знаниями можно выделить из полной сети некоторый ее участок, который охватывает необходимые в данном запросе смысловые характеристики.

Недостатки: сложность поиска вывода на семантической сети.

Фреймы.

Фреймом называется структура для описания понятия или ситуации, состоящая из характеристик этой ситуации и их значений. Пример фрейма представлен на рис. 4.

Структуру фрейма:

ИМЯ ФРЕЙМА:

(имя 1-го слота: значение 1-го слота),



(имя 2-го слота: значение 2-го слота),

-----

(имя N-го слота: значение N-го слота).

Ту же запись представим в виде таблицы, дополнив двумя столбцами.

Достоинства: способность отражать концептуальную основу организации памяти человека, а также гибкость и наглядность.

В докладе проведен анализ построения динамических алгоритмов управления для повышения надежности функционирования технических систем. За основу исследований выбран класс построения интеллектуальных систем – экспертные системы. Предложены модели, которые позволяют решать

такой класс задач, как мониторинг в реальном масштабе времени, обнаружение неисправностей, диагностика, составление расписаний, планирование, оптимизация, протоколирование действий и событий, обеспечение восстановления после сбоя и т. д.

## Литература

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963.
2. Фомичев В. М. Дискретная математика и криптология. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
3. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления. С-Петербург: Политехника, 2003.

# АНАЛИЗ БАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

М. В. Одинцов, А. П. Мартынов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для решения задач, связанных с преобразованием данных посредством шифрования и расшифрования, необходимо использовать криптографические алгоритмы, имеющие определенные характеристики и свойства. Для выявления закономерностей преобразований необходимо провести анализ криптоалгоритмов с целью выявления у них недостатков или особенностей в процессе преобразования входной информации. Наибольший интерес из известных криптоалгоритмов представляют криптоалгоритм ЛЮЦИФЕР фирмы IBM, основанный на базе простейших криптографических преобразований, которые сами по себе не обладают достаточной стойкостью к расшифрованию противником. Криптоалгоритм представляет собой сочетание блоков, реализующих функции подстановки (блок подстановки  $S$ ) и перестановки (блок перестановки  $P$ ). Поочередное применение блоков подстановки и перестановки позволяет создавать криптографические системы определенной сложности и стойкости, достаточных для различных областей применения.

Для понимания полученных в ходе анализа результатов напомним основные моменты реализации криптоалгоритма ЛЮЦИФЕР.

Блок подстановки  $S$  преобразует  $n$ -бит входной последовательности в  $n$ -бит выходной последовательности (для  $n = 3$  см. рис. 1). Этот блок является основным для криптоалгоритма Люцифер, так как осуществляет нелинейные преобразования введенной информации.

Входная комбинация, поступающая на вход блока подстановки, представлена в двоичном  $n$ -битном

коде. В блоке подстановки она поступает на вход дешифратора ДШ1, где преобразуется в позиционный  $N = 2^n$  - разрядный код. Выходы дешифратора ДШ1 с помощью перемычек соединяются с входами дешифратора ДШ2, который осуществляет преобразование  $N$ -разрядного входного кода в двоичный  $n$ -битный выходной код.

Блок перестановки  $P$  представляет собой устройство, преобразующее  $N$  битов информации, поступающей на вход блока, в  $N$  битов зашифрованной информации. Основное отличие от блоков подстановки состоит в том, что блок перестановки только переносит информацию, не осуществляя при этом нелинейные преобразования.

Блок перестановки для входного  $N = 9$  битного кода приведен на рис. 2.

Структура алгоритма преобразования данных Люцифер представляет собой сочетание блоков, реализующих функции подстановки (блок подстановки  $S$ ) и перестановки (блок перестановки  $P$ ).

Структура криптоалгоритма (для 9-разрядной входной последовательности) приведена на рис. 3.

Входные данные при прохождении через чередующиеся слои блоков подстановки и перестановки значительно изменяются, при этом  $S$ -блоки обеспечивают нелинейную подстановку и выполняют «перемешивание» информации, а  $P$ -блоки меняют местами цифры, обеспечивая их «рассеивание».

Значительным моментом, влияющим на определение характеристик преобразования, является объем памяти, необходимый для хранения информации, полученной в ходе преобразования.

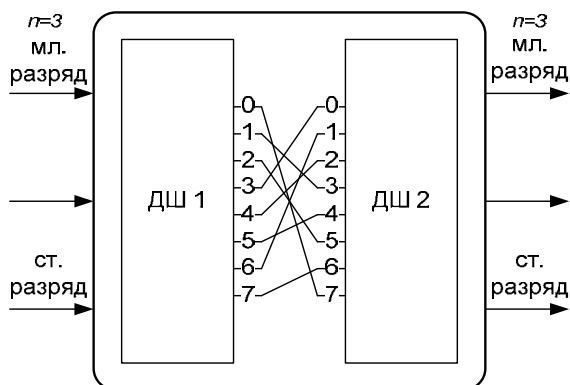


Рис. 1. Блок подстановки  $S$  с разрядностью  $n = 3$

Вход		Выход	
10 с.с	8 с.с	8с.с	10 с.с
0	000	111	7
1	001	011	3
2	010	101	5
3	011	000	0
4	100	010	2
5	101	100	4
6	110	001	1
7	111	110	6

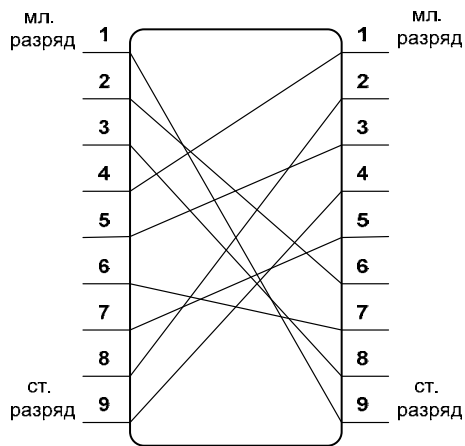


Рис. 2. Блок подстановки  $P$  с разрядностью  $N = 9$

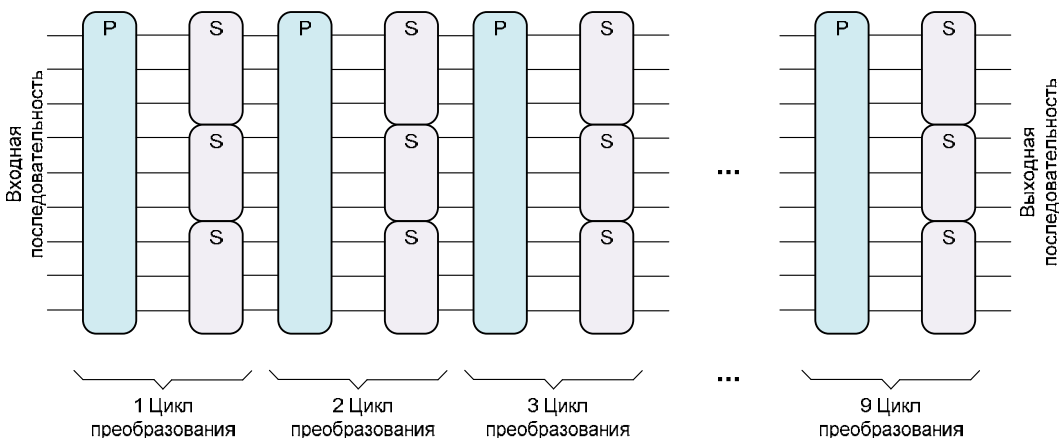


Рис. 3. Структура криптоалгоритма Люцифер с входной 9-разрядной последовательностью

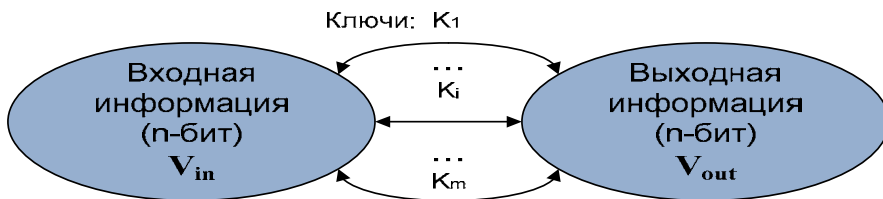


Рис. 4. Преобразование массива входной информации в массив выходной информации

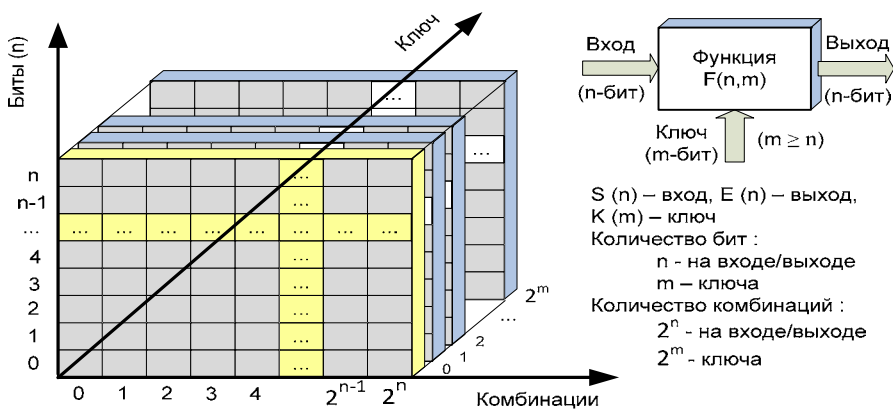


Рис. 5. Графическое представление функции криптографического преобразования и объема памяти, необходимого для хранения входной (выходной) информации

Для определения объема памяти, необходимого для хранения информации, рассмотрим некоторую криптографическую функцию, осуществляющую блочное преобразование информации. Для таких функций преобразование информации осуществляется внутри некоторого массива (рис. 4), в котором объем блока входной информации  $V_{in}$  равен объему блока выходной информации  $V_{out}$  ( $V_{in} = V_{out}$ ).

Разрядность ключа ( $m$ ), в соответствии с которым производится преобразование информации, для криптографических функций должен быть не меньше разрядности входной информации ( $n$ ), т. е.  $m \geq n$ .

Графическое представление функции криптографического преобразования и объема памяти, необходимого для хранения входной (выходной) информации приведено на рис. 5.

В общем случае объем памяти, необходимый для хранения входной информации в битах, равен

$$V_{in} = N_b \times N_n, \quad (1)$$

где  $N_b$  – количество бит входного (выходного) слова,  $N_n$  – число возможных комбинаций значений входного (выходного) слова.

На рис. 5 объем памяти входной информации  $V_{in}$  соответствует прямоугольнику размером  $n \times 2^n$  (выделен желтым цветом). Он равен объему выходной информации  $V_{out}$  для одного из значений ключа ( $m = 0$ )

$$V_{in} = V_{out} \text{ (при } K_i = \text{const)}. \quad (2)$$

Объем памяти, необходимый для хранения выходной информации в битах для всех значений ключа, равен объему памяти входной информации  $V_{in}$ , умноженной на объем (количество комбинаций)  $V_K$

ключа  $K_m$

$$V_{out} = V_{in} \times V_K, \quad (3)$$

где  $V_K = 2^m$  – объем ключа разрядностью  $m$ -бит.

На ЭВМ информацию удобнее хранить, обрабатывать и передавать не в битах, а в байтах. Рассмотрим варианты, когда входная (выходная) информация кратна байту. Объем ключа примем равным объему входной (выходной) информации ( $n = m$ ).

На рис. 6 приведено графическое представление объема памяти, необходимого для хранения входной (выходной) информации кратной 1 байту (1, 2, 3 и 4 байта).

В общем случае объем памяти, необходимый для хранения входной информации в байтах, равен

$$V_{inB} = N_B N_n, \quad (4)$$

где  $N_B$  – количество байт входного (выходного) слова,  $N_n$  – число возможных комбинаций значений входного (выходного) слова.

Объем памяти, необходимый для хранения входной информации в байтах равен объему выходной информации  $V_{outB}$  для одного из значений ключа

$$V_{inB} = V_{outB} \text{ (при } K_i = \text{const)}. \quad (5)$$

Объем памяти, необходимый для хранения выходной информации в байтах для всех значений ключа, равен

$$V_{outB}(K) = V_{inB} V_K, \quad (6)$$

где  $V_K = 2^m$  – объем ключа разрядностью  $m$ -бит.

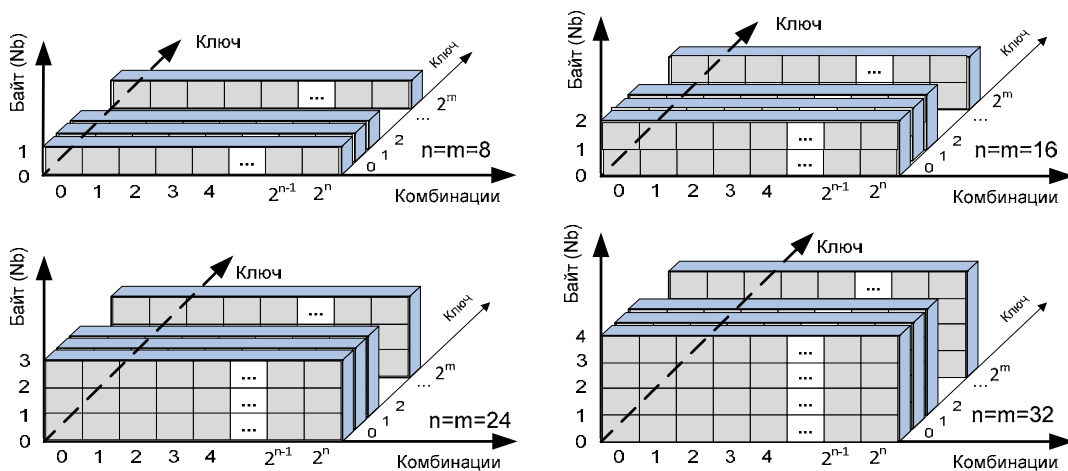


Рис. 6. Графическое представление объема памяти, необходимого для хранения входной (выходной) информации кратной 1 байту (1, 2, 3 и 4 байта)

## Выводы

1. Из анализа результатов расчета видно, что количество комбинаций, а следовательно, и объем памяти, необходимый для ее хранения информации, растут очень большими темпами и, как следствие, использование обычных (не специализированных) компьютеров для решения этих задач становится невозможным.

2. Разработку методов криптоанализа блочных шифров необходимо начинать с массивов минимального объема и двигаться в сторону постепенного увеличения разрядности входной информации.

3. Если адрес выходной последовательности будет совпадать со значением входной последовательности, то они будут жестко взаимосвязаны. В этом

случае объем памяти, необходимый для хранения информации, можно сократить в 2 раза, так как входную последовательность можно не запоминать (значение входной последовательности равно адресу выходной).

## Литература

1. Мартынов А. П., Фомченко В. Н. Криптография и электроника / Под ред. А. И. Астайкина. Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006.

2. Мартынов А. П. Примеры простейших криптографических систем. Саратов: СарФТИ, 1998.

3. Рыжиков Ю. И. Программирование на Фортране. М.: Финансы и статистика, 2001.

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМАЛИЗОВАННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ БЛОЧНЫХ ПУНКТОВ УПРАВЛЕНИЯ АС

*Н. В. Плешакова, А. Н. Анохин \**

Смоленский филиал учебно-тренировочного центра «Атомтехэнерго»

\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»

## **Введение**

При управлении атомной электростанцией (АС) оператору блочного пункта управления (БПУ) приходится быстро и точно ориентироваться в море разнородной информации, получаемой от средств отображения информации и средств коммуникации, а также определять состояние основного и вспомогательного оборудования (систем) и идентифицировать возникающие технологические события.

Поступающую информацию оператору БПУ необходимо воспринять и осмыслить, после чего принять верное решение о применении той или иной процедуры управления. Особенно это важно в условиях нештатных ситуаций. При этом ошибка человека может произойти на любом этапе данного процесса – при восприятии информации, ее сопоставлении, анализе, диагностировании ситуации, выборе и применении требуемой процедуры.

Персонал БПУ оперирует огромным объемом процедур и инструкций. Подобное обилие процедур требует их систематизации, гармонизации и взаимной увязки. Кроме того, работа персонала с процедурами управления, в частности, аварийными процедурами, сопряжена с рядом трудностей, вызванными недостатками самих процедур. Среди таких недостатков можно выделить: отсутствие четко определенных целей процедур и критериев достижения данных целей, неоптимальную последовательность действий процедур; сложные, неунифицированные формулировки шагов, сложную навигацию по процедурам и др.

Таким образом, большое количество аварийных процедур, а также их недостатки значительно снижают надежность работы человека-оператора при управлении энергоблоком (ЭБ) АС. Уменьшить вероятность ошибки позволит четкая формализация процедур, оказание оператору помощи в правильной идентификации сложившихся условий и в выборе требуемой процедуры. Все это становится возможным при разработке системы поддержки операторов БПУ, а именно – системы компьютеризованных аварийных процедур (СКП).

СКП представляет собой информационную систему, которая анализирует сложившуюся на ЭБ ситуацию, осуществляет выбор требуемой процедуры

управления и представляет пошагово данную процедуру оператору БПУ с сопутствующей информацией. Подобная система облегчает навигацию по процедурному полю, дает возможность оператору изменять уровень детализации шагов процедуры, осуществлять мониторинг значений параметров, необходимых для реализации действий, и обладает целым рядом преимуществ по сравнению с бумажными процедурами. Однако, необходимым условием функционирования СКП является формализованное представление процедур и их шагов, благодаря которому становятся возможными интерпретация и выполнение процедур, а также использование знаний процедур при управлении энергоблоком.

Данное исследование является первым шагом на пути создания системы компьютеризованных аварийных процедур. Оно посвящено разработке метода формализованного представления аварийных процедур. Для решения этой задачи было сделано следующее:

- 1) выполнен системный анализ процедур, включающий в себя их классификацию, анализ роли и места;
- 2) выполнено теоретико-множественное описание энергоблока, концепции управления и аварийных процедур;
- 3) выполнен анализ и классификация условий входа (симптомов), шагов и действий процедур.

## **Системный анализ роли и места процедур в процессе управления**

Для формализации процедур необходимо, прежде всего, определить место и роль процедур в процессе управления энергоблоком АС. На первом этапе все состояния АС были разбиты на два больших класса:

- 1) эксплуатационные состояния – режимы нормальной эксплуатации, режимы эксплуатации с отклонениями;
- 2) аварийные состояния – инциденты (аварийные ситуации), проектные аварии, запроектные аварии, тяжелые аварии (рис. 1).

С каждым состоянием станции ассоциируются определенные условия и эксплуатационные пределы. Пределы отделяют один класс состояний от другого. Условия позволяют поддерживать определенное состояние. По условиям и пределам оператор может определить состояние, в котором находится энергоблок, и определить нужный тип процедуры.

Каждый класс состояний АС выдвигает свои цели и приоритеты управления, достигаемые с помощью процедур различного типа. На примере Балаковской АЭС можно выделить следующие виды процедур: инструкции по эксплуатации (ИЭ), процедуры реакции на сигналы, инструкции по действиям при нарушениях нормальной эксплуатации, инструкции по ликвидации аварийных ситуаций (ИЛА), руководство по управлению запроектными авариями (РУЗА), руководство по управлению тяжелыми авариями (РУТА) и др.

Для того, чтобы из разрозненных процедур составить общее процедурное поле деятельности оперативного персонала БПУ АС, необходимо определить их назначение, выполнить их единую идеентификацию, удобно организовать переходы, четко обозначить условия входа в процедуры. Для решения данной задачи было выполнено теоретико-множественное описание энергоблока, концепции управления и аварийных процедур, которое позволило определить пространство возможных состояний энергоблока АС и описать процесс управления ЭБ.

### Теоретико-множественное описание ЭБ АС, концепции управления и аварийных процедур

При построении теоретико-множественного описания энергоблок АС рассматривался как совокупность некоторого технологического оборудования (насосы, задвижки, компенсаторы и т. д.) и технологических сред (пар, вода, масло и др.).

Каждый единичный  $i$ -й элемент оборудования ( $i = 1..n$ ) может находиться в состоянии из конечного множества состояний  $E_i$ . Например, множеством состояний насоса ввода бора TQ13D01 является  $E_{TQ13D01} = \{\text{обесточен, отключен, в резерве, включен}\}$ . Состояние технологических сред характеризуется технологическими параметрами, такими как температура, давление, расход, уровень и др. Каждый  $j$ -й параметр ( $j = 1..m$ ) может изменяться в определенном диапазоне значений  $P_j$ . Например, уровень воды в компенсаторе давления может принимать значения  $P_{LКД} \in [0; 11 \text{ м}]$ . Подмножество декартова произведения указанных множеств образует  $n \times m$ -мерное пространство возможных состояний  $S$  энергоблока АС:

$$S \subseteq E_1 \times \dots \times E_n \times P_1 \times \dots \times P_m.$$

Очевидно, что стационарное состояние АС описывается точкой  $s_k$  в пространстве состояний. Переходный режим представляет собой множество точек, т. е. траекторию в пространстве состояний, совершаемую во времени –  $A = \{< s_k, t_k >\}$ .

За управление энергоблоком АС, находящимся в одном из достижимых состояний пространства  $S$ , отвечает общий алгоритм управления, т. е. набор условий, проверок, команд и операций. Частью алгоритма управления является система защит и блокировок. В некоторых состояниях ЭБ управление полностью осуществляется автоматически, при этом оператор лишь информируется о каких-либо произошедших событиях. Однако в большинстве состояний часть операций и команд осуществляется оперативным персоналом БПУ вручную одновременно с контролем действий автоматики. При этом операторы используют процедуры управления.

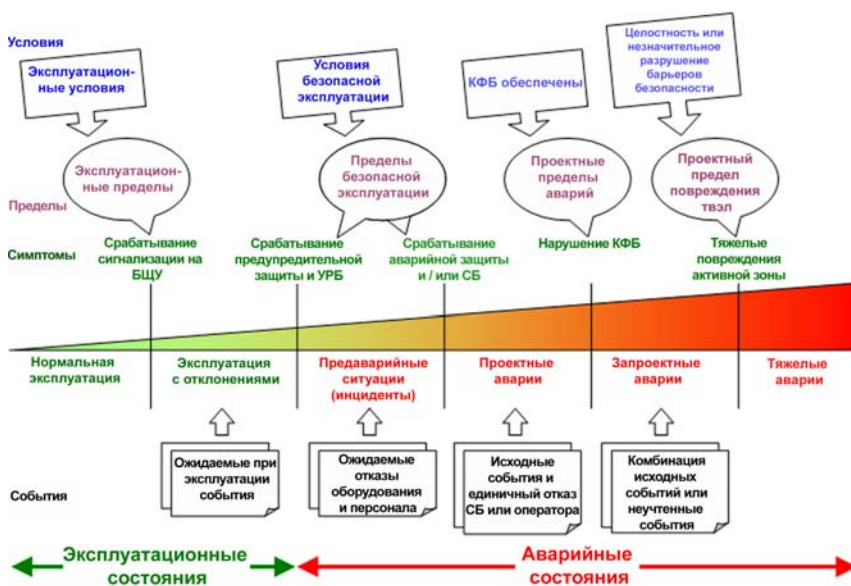


Рис. 1. Состояния атомной электростанции



Количество состояний пространства  $S$  бесконечно, поэтому определить алгоритм управления или процедуру управления для каждого отдельного состояния невозможно. По этой причине состояния объединяются в множества (или подпространства) состояний, для которых характерны общие операции и команды алгоритма управления. Если состояния данного множества требуют ручного оперативного управления, то должна существовать процедура для персонала БПУ.

С учетом введенных обозначений, процесс управления энергоблоком должен описываться следующими характеристиками:  $s_1$  – исходное состояние энергоблока;  $s_G$  – целевое состояние ЭБ, или подпространство состояний, т. е. состояние, в котором должен находиться ЭБ в случае успешного выполнения процедуры или алгоритма управления;  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  – множество управляющих воздействий, переводящих ЭБ из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ ;  $V$  – множество внешних воздействий на ЭБ;  $A = \{<s_1, t_0>, <s_1, t_1>, \dots, <s_G, t_{n+1}>\}$  – траектория переходного процесса при успешной реализации управляющих воздействий.

Для построения теоретико-множественного описания аварийных процедур, проясним значения некоторых понятий.

Введем понятие симптома. *Симптом* – это логическое условие, накладываемое на состояние оборудования или значение технологического параметра, например, «давление под оболочкой более  $0,3 \text{ кгс/см}^2$  ( $P_{ГО} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ )» или «локализирующая арматура закрыта». Каждый симптом  $x_i$  или совокупность симптомов  $X = \{x_1 \dots x_n\}$  «отсекает» определенную часть пространства состояний, образуя при этом отношение (т. е. подмножество пространства состояний)

$$R(X) \subseteq S.$$

Совокупность симптомов образует критерий применения или, другими словами, условие входа в ту или иную процедуру. Иначе говоря, совокупность симптомов выделяет подмножество состояний, к которым применима некоторая процедура.

Предположим, что  $X_i$  и  $X_j$  – совокупности симптомов, являющихся входами в процедуры  $w_i$  и  $w_j$  соответственно. Тогда должно выполняться условие  $R(X_i) \cap R(X_j) = \emptyset$ , обеспечивающее однозначный выбор необходимой процедуры (при этом необязательно, чтобы выполнялось  $X_i \cap X_j = \emptyset$ ). Однако гипотетически могут существовать процедуры, для которых это условие не выполняется, поскольку реальные описания процедур несовершенны.

Существует проблема, заключающаяся в том, что симптомы некоторых процедур пересекаются или близки друг другу, в результате чего некоторые аварии плохо различимы. Трудности, возникшие у операторов БПУ в идентификации процедур, упоминались в их интервью, а также следовали из анализа существующего комплекта процедур.

Еще одно понятие, имеющее отношение к процедурам, – *управляющее воздействие*. Аварийная процедура содержит счетное множество управляющих воздействий, составляющих множество  $U$ , кото-

628  
рые представляют собой шаги и действия процедуры. Каждое управляющее воздействие имеет целью перевести ЭБ из одного состояния  $S_i$  в другое состояние  $S_j$ . При этом цель воздействия может быть достигнута (блок переведен в состояние  $S_j$ ) или не достигнута. В последнем случае ЭБ окажется в состоянии  $S_j^*$ .

Если каждое управляющее воздействие было выполнено успешно, то множество всех успешных реализаций управляющих воздействий переведет ЭБ в определенное подпространство целевых состояний  $s_G$ . Однако с каждой неудачной реализацией управляющего воздействия состояние ЭБ «отклоняется» от упомянутой выше траектории переходного процесса  $A$ . Если подобных «отклонений» будет слишком много, то в результате накопившихся ошибок после применения процедуры состояние ЭБ не будет принадлежать подпространству целевых состояний  $s_G$ .

Кроме управляющих воздействий, аварийная процедура имеет набор шагов, не требующих от оператора моторных действий. Это – шаги контроля, принятия решений, коммуникации, и действия навигации по процедуре, которые, в зависимости от состояния ЭБ, либо уточняют последовательность применения процедуры, либо определяют «точку останова» для оператора, где нужно прекратить работу с данной процедурой и начать применение другой процедуры управления.

Теперь можно определить некоторые *принципы применения аварийных процедур* операторами БПУ АС.

Во-первых, в результате непрерывного протекания технологических процессов и возможного влияния других внешних факторов (пожары, затопления и др.) изменение состояний ЭБ происходит непрерывно. При этом оператор улавливает данные изменения состояний только в дискретные моменты времени.

Во-вторых, решение о применении той или иной процедуры управления оператор принимает на основе анализа текущего состояния энергоблока посредством сопоставления данного состояния с симптомами процедур. Далее оператор выполняет по очереди все действия и шаги выбранной процедуры. Каждое действие направлено либо на оценку и контроль состояния ЭБ, либо на перевод ЭБ из состояния  $S_i$  в  $S_j$ .

Однако существуют нюансы в управлении ЭБ АС. Оценка того, применим и правомерен тот или иной шаг процедуры, осуществляется оператором на основе текущего состояния ЭБ. Это состояние и результат выполнения шага он фиксирует в памяти. Тем не менее, под влиянием различных факторов состояние ЭБ может измениться в любой момент, в частности, между выполнениями оператором дейст-

вий процедуры. Таким образом, создается предпосылка для ошибок операторов из-за различия между их ментальной моделью и реальным состоянием блока.

Таким образом, было выполнено теоретико-множественное описание ЭБ, концепции управления и аварийных процедур, а также определены некоторые принципы применения процедур. Дальнейшая формализация аварийных инструкций предполагает выполнение классификации их симптомов, шагов и действий.

### Классификация условий входа (симптомов) аварийных процедур

Симптом – это логическое условие, накладываемое на состояние оборудования или значение технологического параметра. Можно выделить следующие классы симптомов:

– *симптомы по технологическому параметру*, которые представляют собой утверждения, содержащие информацию о тенденции или границах изменения какого-либо технологического параметра (например, «Снижение температуры подпиточной воды на выходе из РТО 1TK80W01 до (60-70) °С»);

– *симптомы по оборудованию*, которые представляют собой утверждения, содержащие информацию о состоянии или изменении состояния технологического оборудования (например, «СК ТК закрыты – индикация положения 4SE11,12,13,14S01 «закрыто»»).

В процедурах часто встречаются симптомы, которые описывают, какая аварийная сигнализация сработала при возникновении данного события. Например, срабатывание табло аварийной сигнализации «Отключение ТГ от сети». Однако срабатывание любой аварийной сигнализации является следствием изменения состояния оборудования ЭБ или значения

технологического параметра. Таким образом, симптомы, содержащие описание сработанных сигнализаций, можно отнести к одному из выделенных классов.

### Классификация шагов и действий аварийных процедур

Аналогично симптомам была выполнена классификация шагов и действий аварийных процедур (рис. 2).

Рассмотрим все виды шагов и действий более подробно.

1. Действия, различающиеся по характеру заложенной деятельности.

Эти действия отражают тот вид физической или ментальной деятельности, которую выполняет оператор БПУ при исполнении шага или действия. Выделяют:

– *действия контроля*, когда оператор осуществляет контроль состояния ЭБ, а именно, значений технологических параметров, состояния оборудования или срабатывания аварийной сигнализации;

– *моторные действия*, когда оператор осуществляет перевод ЭБ из одного состояния в другое, а именно, воздействует на органы управления пультов и панелей БПУ (поворот ключа, включение/выключение, нажатие кнопки и т. д.);

– *действия регулирования*, когда оператор постепенно достигает желаемого состояния ЭБ, а именно, осуществляет регулировку или устанавливает требуемое значение определенного технологического параметра;

– *действия принятия решений и диагностики* (идентификации, обнаружения, вычисления), когда оператор проводит диагностику текущего состояния ЭБ, отслеживает развитие ситуации, осуществляет вычисления или иные умственные операции и/или принимает соответствующие управленческие решения;

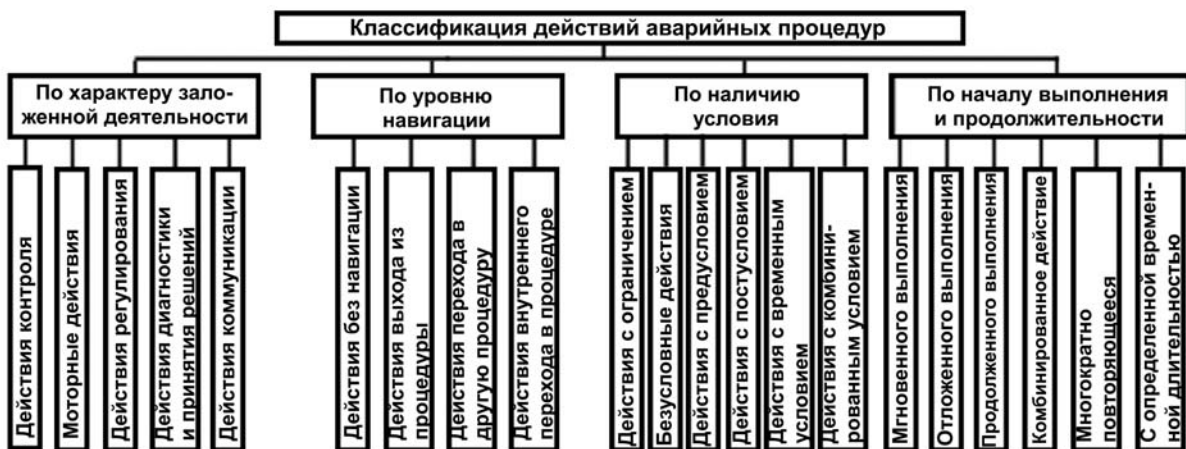


Рис. 2. Классификация шагов и действий аварийных процедур

– *действия коммуникации*, когда оператор сообщает информацию другим операторам, запрашивает информацию, получает разрешение на выполнение действий, т. е. осуществляет коммуникацию с другими субъектами управления.

2. Действия, различающиеся по уровню навигации.

Действия навигации не содержат никакой физической или ментальной деятельности, а только лишь являются служебными для процедуры. Они уточняют последовательность выполнения команд процедуры в зависимости от текущего состояния ЭБ, способствуя перемещениям оператора внутри процедуры, между ними или выходу из процедурного поля. Выделяют:

– *действия без навигации* – действия, которые не содержат в себе переходов к другим шагам и действиям процедуры, кроме автоматического перехода к следующему шагу по окончании выполнения текущего шага;

– *действия выхода из процедуры* – действия, содержащие команду «Выйти из раздела»;

– *действия перехода в другую процедуру* – действия, содержащие команду перехода в другую процедуру в виде предложения «Перейти в процедуру X, шаг Y»;

– *действия внутреннего перехода в процедуре* – действия, содержащие команду перехода на другой шаг текущей процедуры в виде предложения «Перейти к шагу X» или «Вернуться к шагу Y».

3. Действия, различающиеся по наличию условия.

Условные действия выполняются (или не выполняются) в зависимости от успешности срабатывания условий. Выделяют:

– *безусловные действия* – действия, не содержащие условие выполнения;

– *действия с предусловием* – действия, которые выполняются, если удовлетворено некоторое условие; при этом выполнение действия происходит медленно;

– *действия с постусловием* – действия, которые завершают выполнение в тот момент, когда удовлетворено некоторое условие;

– *действия с комбинированным условием* – действия, которые содержат и предусловие, и постусловие;

– *действия с временным условием* – действие, условие выполнения которого содержит время или временной интервал;

– *действия с ограничением* – действие, в процессе выполнения которого требуется, чтобы соблюдалось некоторое ограничение.

4. Действия, различающиеся по началу выполнения и продолжительности.

Данный тип действий имеет значение для оперативного персонала во время применения процедуры и обуславливает начало выполнения действий и шагов процедуры и продолжительность их выполнения. Различаются:

– *действие мгновенного выполнения* – действие, которое выполняется в тот момент, когда встречается в ходе использования процедуры;

– *действие отложенного выполнения* – действие, которое содержит некоторое условие и выполняется в тот момент, когда срабатывает данное условие;

– *действие продолженного выполнения* – действие, которое начинает выполняться в момент, когда встречается в ходе использования процедуры, но не достигает своего результата до начала реализации следующего действия;

– *многократно повторяющееся действие* – действие, которое выполняется в соответствии с периодом выполнения, например, раз в 30 минут;

– *действие с определенной временной длительностью* – действие, длительность выполнения которого строго регламентирована;

– *комбинированное действие* – действие, которое является комбинацией предыдущих типов (например, действие продолженного выполнения с определенной временной длительностью).

## Заключение

Таким образом, данная работа посвящена проблеме формализации аварийных процедур для управления энергоблоками АС в условиях аварийных ситуаций. В ходе работы был выполнен системный анализ роли и места процедур в процессе управления, выполнено теоретико-множественное описание энергоблока АС, концепции управления и аварийных процедур, а также классифицированы условия входа, шаги и действия процедур.

Следует отметить, что все процедуры управления написаны на естественном языке. Семантически каждый симптом, шаг или действие представляют собой предложения, т. е. имеют вербальное описание, что является существенным недостатком инструкций. Например, один и тот же симптом может быть написан по-разному в разных процедурах. Также велика вероятность орфографических и логических ошибок. Все это существенно затрудняет понимание и анализ условий входа, шагов и действий процедур для человека-оператора БПУ АС. Поэтому развитием работы будет служить создание метода представления знаний, который позволит:

– унифицировать описание, провести синтаксический и семантический анализ всех формулировок симптомов, шагов и действий процедур;

– построить таблицу решений, предназначенную для формального диагностирования ситуации на ЭБ, выбора требуемой процедуры и различения аварий, имеющих близкие симптомы;

– разработать единую базу знаний инструкций для последующего создания системы компьютеризованных аварийных процедур.

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ИТ-РЕШЕНИЙ В СКВОЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

С. В. Серикова, А. В. Трищенко, В. Л. Ведерников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Информационные технологии – это автоматизированные способы сбора, передачи, обработки и визуализации информации. Использование высокоэффективных интегрированных информационно-управленческих технологий стало магистральным направлением перестройки системы управления в развитых странах.

Учитывая возрастающие требования по обеспечению качества наукоёмкой продукции, выпускаемой предприятиями ЯОК РФ, а также необходимость сокращения сроков выпуска продукции и снижения её себестоимости, для повышения эффективности производственных процессов требуется применение специализированных систем, обеспечивающих решение задач, возникающих на всех этапах жизненного цикла продукции [1].

Таким образом, в настоящее время перед предприятиями ЯОК поставлена задача построения информационно-технологической инфраструктуры, включающей в себя комплексы технологического оборудования, технические и программные средства, системы управления и коммуникаций, образующие систему функционирования информационных технологий на предприятиях.

## Формирование концепции автоматизированной системы

Реализация описанной задачи опирается на концептуальное представление автоматизированной системы (АС), реализующей сквозной цикл «проектирование – производство – эксплуатация – утилизация».

Инфраструктура такой АС представлена на рис. 1.

Для более эффективной реализации каждого проблемного круга задач, возникающих на этапах сквозного цикла разработки высокотехнологичной продукции, могут применяться АС различной направленности, классифицируемые по следующим направлениям [2]:

– по стадиям разработки проекта (АС исследовательских стадий, АС технического и рабочего проектирования, интегрированные АС);

– по типу проектируемой продукции (специализированные – для конкретного типа; универсальные);

– по разделам проекта (частные, общие);

– по логике работы (расчетная, оптимизирующая, моделирующая);

– по «степени интеллекта» (детерминированные – используют жесткие расчетные и логические схемы; системы, допускающие самоперестроение своей структуры);

– по характеру взаимодействия с пользователем (автоматические – подготовка исходных данных, задание режима работы системы и получение результатов; автоматизированные – активное взаимодействие с пользователем);

– по архитектуре системы (персональная, распределенная).

Само использование автоматизированных систем является необходимым условием создания конкурентоспособной российской промышленности. Как показывают исследования, по ряду причин при выборе АС предпочтение следует отдавать отечественным разработкам. Это обусловлено следующими факторами:

- АС являются контейнером, аккумулирующими опыт проектирования. Заимствование зарубежных систем ведёт к отказу от собственного опыта разработки уникальных проектов; кроме того, заложенные в них нормы и правила проектирования изделий отличаются от российских стандартов;

- АС – это высокие технологии.

Собственные разработки должны учитывать как положительный, так и отрицательный зарубежный опыт. Кроме того, безусловно, должна быть обеспечена связь с основными зарубежными АС для обмена данными.



Рис. 1. Инфраструктура автоматизированной системы

Концепция архитектуры АС как совокупности программных средств показана на рис. 2. Основными подсистемами АС данной архитектуры являются: база знаний, подсистема приобретения знаний, подсистема обработки знаний и сервисная подсистема.

*База знаний* представляет собой программную реализацию информационного обеспечения АС. Она управляется специальным программным компонентом – системой управления базой знаний (СУБЗ). Основные функции СУБЗ: сохранение семантической целостности данных, обслуживание информационных запросов пользователя и обрабатываемых модулей АС. Вся информация, необходимая для работы АС сосредоточена в архивах, библиотеке примитивов и объектах-фреймах. В проблемно-ориентированном архиве хранятся когда-либо синтезированные АС модели проектируемых систем в виде цепочек ссылок на соответствующие программные модули, готовые документы и шаблоны в виде программ, формирующих конструкторскую документацию в соответствии со стандартами, а также сложные рисунки (например, трехмерные изображения разработанных изделий). Объектно-ориентированный архив содержит полную информацию по конкретному варианту разработанного изделия. Здесь же хранится вся информация по комплектующим изделиям, математические модели которых не могут быть построены средствами АС.

*Библиотека примитивов* содержит средства для создания элементарных фрагментов обрабатываемых модулей (например, базовые формулы для расчета масс компонентов, из которых может состоять разрабатываемое изделие), изображений (например, простейших геометрических фигур и тел, из которых формируются более сложные изображения), текста (например, содержание штампов конструкторской документации). Во фреймах-объектах хранится информация о компонентах изделия и об изделии в целом, разрабатываемом с помощью АС в данный момент.

В фреймах-объектах хранится информация о компонентах изделия и об изделии в целом, разрабатываемом с помощью АС в данный момент.

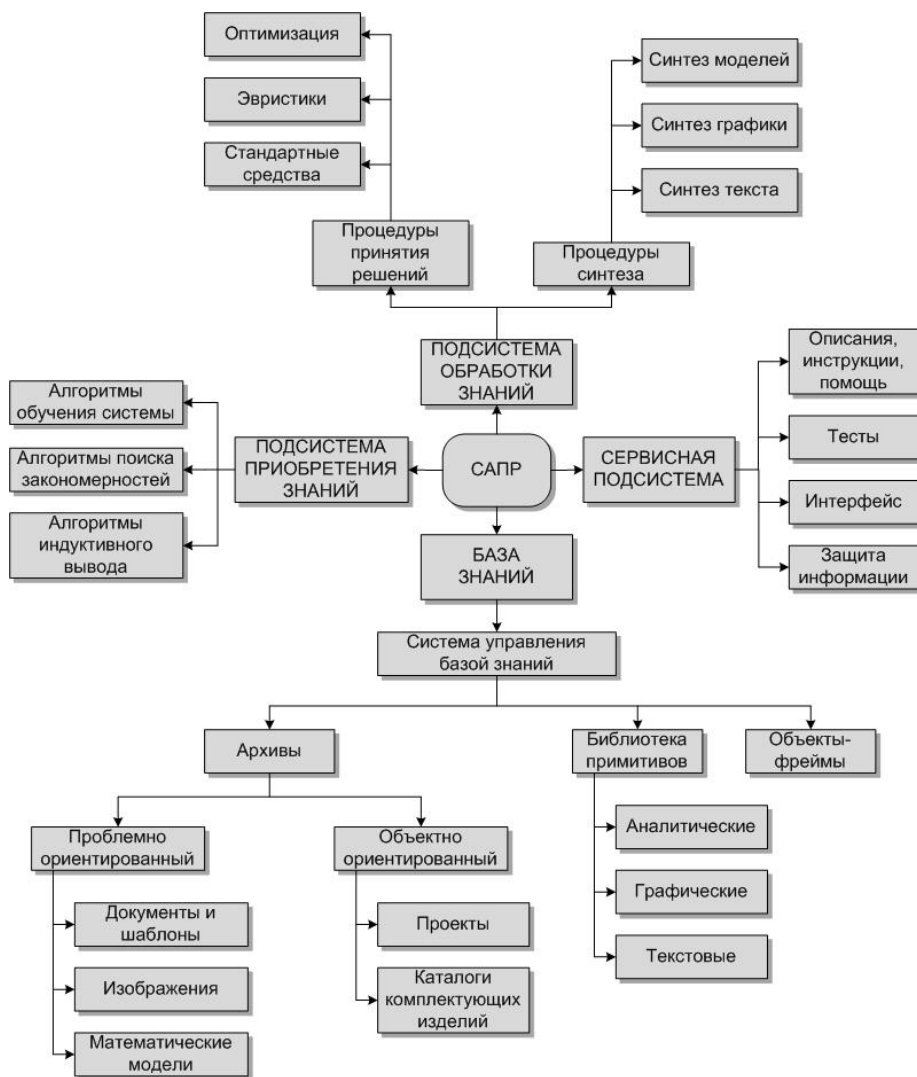


Рис. 2. Концепция архитектуры АС

Подсистема приобретения знаний предназначена для сопровождения и модернизации АС. Алгоритмы поиска закономерностей – это алгоритмы методов, аналогичных методу наименьших квадратов. Их основная задача – создание на основе информации, хранящейся в базе знаний АС, новых аналитических зависимостей. Эти зависимости в виде формул включаются в библиотеку примитивов и применяются для синтеза математической модели разрабатываемого изделия. Алгоритмы индуктивного вывода служат для установления новых смысловых связей между фрагментами базы знаний. Алгоритмы обучения системы – это программно реализованные методы формирования процедур принятия проектных решений (например, формирования решающих правил типа «если – то»).

*Подсистема обработки знаний* – это программы, реализующие математическую модель изделия путем ее синтеза из соответствующих примитивов и формирующие выходную информацию по проекту. Данная подсистема содержит также алгоритмы, имитирующие принятие проектных решений. Среди таких процедур выделяются алгоритмы оптимизации, эвристики (например, решение задачи поиска объекта, когда траектория поиска представляет собой раскручивающуюся спираль), а также «стандартные средства», под которыми в первую очередь понимаются различные балльные системы и шкалы предпочтений для отбора вариантов проекта.

*Сервисная подсистема* представляет собой инструмент для общения пользователя с АС. Она включает собственно интерфейсную часть, состоящую из набора различных меню, в т. ч. и графических, позволяющих пользователю вводить исходные данные, настраивать АС на решение конкретной задачи, контролировать процесс проектирования, задавать формат выходных данных и т. д. Интерфейс может содержать и встроенный язык общения пользователя с АС. В сервисную подсистему входит система помощи пользователю с описаниями инструкций в случае нештатного поведения АС и комментариями, выдаваемыми по запросу пользователя. Данная подсистема содержит набор тестов для текущих проверок работоспособности АС и средства защиты АС и ее компонентов от несанкционированного доступа (пароли, средства зашифровывания и расшифровывания информации и т. п.).

## Этапы разработки и внедрения АС

Основные шаги по формированию АС сквозного проектирования высокотехнологичной продукции показаны на рис. 3.

Этап 2 соответствует принятию принципиального решения о возможностях будущей АС и характере ее математического и программного обеспечения. АС начальных стадий требуют более мощной интеллектуальной поддержки, им присуща более высокая

степень использования оптимизационной техники. Для АС технического и рабочего проекта большее значение имеют сетевые технологии, получение детальных высококачественных чертежей и т. д. Выбирается принципиальная модель моделирования процесса проектирования: как поиск в пространстве состояний или в пространстве подзадач, или же в комбинации указанных подходов.

Следующий этап в создании АС заключается в обследовании проектной организации с целью представления процесса проектирования заданного объекта на выбранной стадии как «черного ящика». Входом является информационный вектор, компонентами которого являются информационные элементы технического задания на проектирование, установленные на этапе 3. Выходной информационный вектор «черного ящика» образован информационными элементами проекта (этап 4). Сам процесс проектирования (механизм «черного ящика») описывается номенклатурой проектных процедур (этап 5).

В результате решения этих задач экспертами выпускается следующая документация:

- логическая схема построения проекта, отображающая номенклатуру и взаимодействие проектных процедур, задействованных в АС;

- шаблоны входной и выходной информации для отдельных проектных процедур АС в целом.

Для отработки указанной документации используются существующие в проектной организации стандарты, нормативы, технические архивы.

В дальнейшем определяется принципиальная схема АС (этап 6) и состав ее технических средств (этап 7). Под принципиальной схемой понимается конфигурация сетевой структуры («клиент-сервер», кольцевая сеть, схема с центральным компьютером повышенной мощности и т. д.). На этапе 7 особое внимание должно уделяться выбору периферийных устройств – в частности, устройствам вывода графической информации.

После определения объема автоматизируемых проектных работ и выбора основных технических средств оценивается экономическая целесообразность разработки АС (этапы 8 и 9).

Следующим шагом в процессе разработки АС является формирование матрицы информационных потоков (МИП), отображающей схему преобразования информации из технического задания в проект. На этапе 10 процесс проектирования технической системы распадается на множество «маленьких черных ящичков», число которых соответствует количеству проектных процедур, входящих в номенклатуру, определенную на этапе 5. Каждая проектная процедура характеризуется своим входом и выходом. Стыковка входов и выходов проектных процедур с целью получения общей информационной схемы процесса проектирования составляет существо алгоритма обработки МИП. Информационные элементы входов, не получаемые из технического задания и (или) других проектных процедур, образуют часть номенклатуры элементов базы знаний.

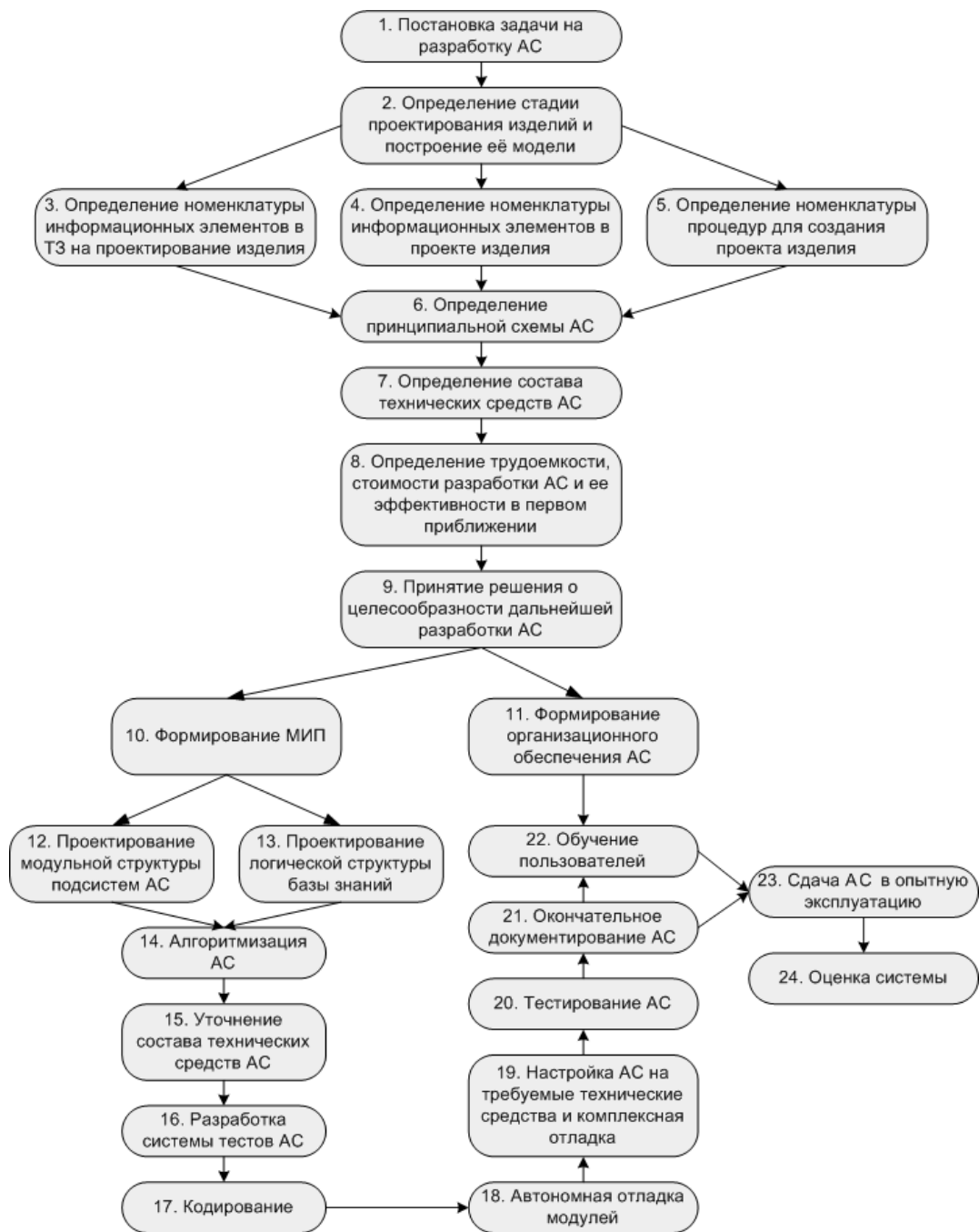


Рис. 3. Этапы формирования АС

Параллельно ведутся работы по организационному обеспечению будущей АС (этап 11). В проектной организации создается специальное подразделение, ответственное за поэтапное внедрение АС. Возглавляет работу руководитель организации или его заместитель. К разработке системы привлекаются специалисты проектных и конструкторских отделов, в частности, для формирования и анализа матриц информационных потоков (МИП). Определяется порядок взаимодействия АС и пользователя, принимаются меры по защите конфиденциальной информации.

После формирования МИП начинаются работы по проектированию модульной структуры АС (этап 12) и логической структуры базы знаний (этап 13).

Важнейшим качеством АС является ее адаптивность к решению новых задач. Эта возможность обеспечивается стандартизацией формы представления информации и отделения информации от обрабатывающих эту информацию модулей. Проблема представления информации (данных) в АС решается с помощью базы знаний.

На следующем этапе процесса разработки АС (этап 14) разрабатываются алгоритмы всех проект-



ных процедур, входящих в подсистему обработки знаний, определяющих проблемную ориентацию системы и образующих математическую модель синтеза объекта. Таким образом разрабатываются механизмы внутреннего функционирования «черных ящиков», связывающие их входы и выходы. На этом же шаге разрабатываются и метапроцедуры, такие как методы оптимизации, алгоритмы, входящие в подсистему приобретения знаний и сервисную. Выполнение шага алгоритмизации означает создание математической модели АС в целом.

Когда составлена математическая модель системы, возможно уточнение состава технических средств, способных реализовать данную модель. Кроме того, на этапе 15 выбирается операционная система, в среде которой будет функционировать АС, и определяется набор готовых программных продуктов, которые должны быть интегрированы в систему.

Этап 16 объединяет работы по разработке системы тестов АС.

Перевод математической модели АС в программное обеспечение составляет суть процесса кодирования (этап 17). Здесь логические модули представляются как совокупность программных модулей.

Этап 18 процесса разработки АС связан с автономной отладкой модулей.

На этапе 19 осуществляется комплексная отладка. Основные усилия направлены на устранение ошибок в межмодульных связях.

Тестирование АС (этап 20) – это процесс выполнения программы с целью найти в ней ошибки и устранить их. Здесь реализуются тесты, разработанные на этапе 16.

Отдельной проблемой является изготовление документации по разрабатываемой системе (этап 21). В начале разработки формулируются и оформляются

в виде документов требования к результату работы, цели проекта и внешние спецификации. Результатом процесса разработки архитектуры системы является документация, описывающая разбиение программной системы на основные части (компоненты, подсистемы, программы, процессы или уровни абстракции). Документация должна описывать функцию каждой компоненты, точные сопряжения между компонентами и структуру системы.

Этапы 22, 23, 24 процесса разработки АС включают обучение пользователей, сдачу АС в опытную эксплуатацию, а также оценку системы.

## **Заключение**

В результате работы разработан методологический аппарат формирования и внедрения ИТ-решений в сквозные процессы разработки высокотехнологичной продукции. Предложена структура АС, адаптируемой под задачи предприятия.

Создан алгоритм формирования АС, выработаны решения по организации базы знаний АС, учитывающие особенности процесса проектирования спецтехники.

## **Литература**

1. Судов Е. В., Левин А. И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2002.
2. Гайкович А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем. С-Пб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001.

# ПРОБЛЕМА ОЦЕНИВАНИЯ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ

*С. А. Скрябин, А. В. Трищенко*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Ни кому не нужно демонстрировать цифры и графики для того чтобы охарактеризовать состояние радиоэлектронной и информационно-вычислительной промышленности России в начале XXI века. В головах современных россиян слова «импортный», «ино-марка» являются практически синонимами совершенства технических средств, особенно это касается надежности, удобства, стиля и уровня инноваций. Исключения, пожалуй, составляют изделия китайской промышленности. Однако и они в последние несколько лет по своей надежности приближаются к образцам российской сборки, а по остальным показателям давно их превосходят. Оценка искусственных систем требуется практически всем отраслям науки и производства, призвана способствовать улучшению адекватности принимаемых решений, указывать направления для коррекции частных характеристик производимой продукции, и ее качества в целом.

Как в начале 80-х годов XX века, так и сегодня, отсутствуют системные методы оценки, направленные на независимое обобщающее описание искусственных систем. Оценивание происходит только локально, относительно экономических, технических, социальных, политических или других характеристик, наиболее важных в каждом конкретном случае. Это значит, что многокритериальное оценивание производят опираясь на одну основную характеристику. По ней происходит определение степени значимости других характеристик, после чего они сопоставляются и приобретают связанность. Однако, это односторонний подход к вопросу. Такой подход еще в 80-х способствовал тому, что свыше 50 % разработок, представляемых для внедрения, не могли быть одобрены из-за конструктивных и технологических недоработок. Около 17 % образцов вообще не доводились до серийного изготовления. Лишь немногим более 20 % изготовленных образцов осваивалось в год их создания. Тогда в нашей стране в отраслевых промышленных институтах и КБ предприятий 70–80 % исследований было направлено на совершенствование существующих технических средств [1]. То есть разработки были не проработаны, были «сырыми». Отсутствие системных методов оценки, которые оперативно сигнализировали бы о несоответствии технических систем (ТС) важным

критериям способствовало усугублению сложившейся ситуации. Одномерный подход еще больше сбивал с толка, отражая усредненные оценки ТС. Общая оценка системы в этом случае могла быть скомпенсирована отличными характеристиками в одной области перед неприемлемыми характеристиками в другой области. О значимости критериев эргономичности и экологичности для общей оценки ТС пытались судить по их вкладу в ценообразование по так называемому «экономическому методу оценки значимости частных характеристик ТС».

Однако, также известно, что после пятилетки качества 1985–1990 гг. в отечественном машиностроении произошло некоторое повышение технического уровня и качества создаваемой продукции. К примеру, уровень унификации металлорежущих станков повысился до 60–80 %, автомобилей – до 70–80%. Уровень материалоемкости в отрасли тяжелого машиностроения за пять лет снизился на 2–15 %, а на предприятиях электротехнической промышленности – на 10–25 %. Еще в большей мере уменьшилась удельная материалоемкость отдельных видов машин. Например, применительно к тракторам этот показатель снизился на 40 % [2]. Этим достижениям способствовала выработка правительством страны адекватной стратегии развития производства, и другие последовавшие за этим теоретические, практические и экономические эффекты (в том числе теоретическое развитие методов квалиметрии).

В этой работе предполагается охарактеризовать недостатки существующих подходов к оцениванию и выработать концепции метода системной оценки ТС.

Практическая ценность разработки системного оценивания предполагает повышение эффективности принятия решений при разработке и совершенствовании ТС.

Кроме того, оценивание – это процесс на котором может быть основана формализация – одна из связующих частей теории и практики.

Прогресс капиталистической науки, согласно одной из точек зрения, связан с тем, что любые ее разработки находили адекватную прагматическую оценку и скорейшее внедрение их результатов в производство. Поскольку мы отстаем от запада и в науке и в технике, создание более совершенных методов оценивания актуально для современной России. Оно способствует наращиванию отечественного научно-технического потенциала.

## Системное оценивание: суть и пути его реализации

Системный анализ – это научный метод познания, представляющий собой последовательность действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы. СА опирается на комплекс общенаучных, экспериментальных, естественнонаучных, статистических, математических методов [3]. Это взаимосвязанное логико-математическое и комплексное рассмотрение всех вопросов, относящихся не только к замыслу, разработке, производству, эксплуатации и последующей ликвидации современных технических средств, но и к методам руководства всеми этими этапами с учетом социальных, политических, стратегических, психологических, правовых, географических, демографических, военных и других аспектов [4]. Некоторые методы СА отражает табл. 1 [5].

Таблица 1

Некоторые методы СА

Абстрагирование и конкретизация
Анализ и синтез, индукция и дедукция
Формализация
Композиция и декомпозиция
Линеаризация и выделение нелинейных составляющих
Структурирование и реструктурирование
Макетирование
Рейтингинг
Алгоритмизация
Моделирование и эксперимент
Программное управление и регулирование
Распознавание и идентификация
Кластеризация и классификация
Оценивание и тестирование
Верификация

Оценивание (какого-либо предмета или процесса) – это процесс нахождения оценок (непосредственных величин, либо обобщающих значений, которые являются отражением значимости оцениваемого предмета либо процесса), которые признаются наиболее объективным отражением состояния предмета либо процесса.

Процесс системного оценивания (СО) должен быть основан на тех же принципах, что и СА (системный подход, структурность), поскольку его цель – это комплексная многокритериальная оценка предмета или процесса с целью его ранжирования. Кроме того, разнородные характеристики объектов (наджность, эргономичность, качество работы, экономичность) могут сопоставляться нелинейно и многомерно. Частные характеристики, составляющие главную

характеристику (для экономичности: технологичность, дешевизна, экологичность) могут быть сопоставлены и конвертированы в одно число.

Существует несколько подходов к оцениванию. Локальные методы оценивания характеризуют оцениваемый объект либо односторонне (с экономической, экологической или политической точки зрения), либо многосторонне, но различные характеристики сопоставляются между собой по степени вклада каждой характеристики в наиглавнейший критерий. Приведем пример экономического метода определения весовых коэффициентов частных характеристик в нижеследующей формуле. (метод очень актуален для «дикого» капитализма):

$$q = \frac{\Delta C}{\Delta K},$$

где  $q$  – весовой коэффициент частного критерия  $K$ ;  $\Delta C$  – изменение того критерия, вес которого необходимо определить;  $\Delta K$  – изменение частного критерия, наиболее полно отражающего общую ценность предмета или явления [6];  $C$  – условные денежные единицы.

Абстрактный подход к оцениванию существует в рамках статистического оценивания. Это есть всякая функция результатов наблюдений над некоторой случайной величиной, с помощью которой судят о значении оцениваемого параметра [7].

Таблица 2

Типы статистического оценивания [1]

Линейное оценивание – когда уравнения модели и/или их решения линейные.	Нелинейное оценивание – когда уравнения модели и/или их решения нелинейные.
Точечное оценивание – такое, при котором находятся только некоторые частные характеристики ТС.	Интервальное оценивание – расчет вероятности, что верная оценка находится в некотором интервале.

Более востребованными являются методы нелинейного оценивания (НО). НО – это процесс нахождения значений параметров математической модели, заданной нелинейными уравнениями. Методы НО довольно сложны, однако на практике именно они оказываются наиболее востребованными, поскольку многие задачи, которые описаны линейными уравнениями для решения требуют манипуляций с нелинейными уравнениями [1].

Вышеуказанные методы используются в квалиметрии при аналитической оценке качества технических средств. Задача квалиметрии – свести множество показателей качества в одно число – комплексную оценку качества. Процесс такого оценивания изображен на рис. 1 [5].

На всех стадиях квалиметрической оценки существуют проблемные ситуации, в силу которых существующие методы оценивания не дают высокоточной оценки объектов.

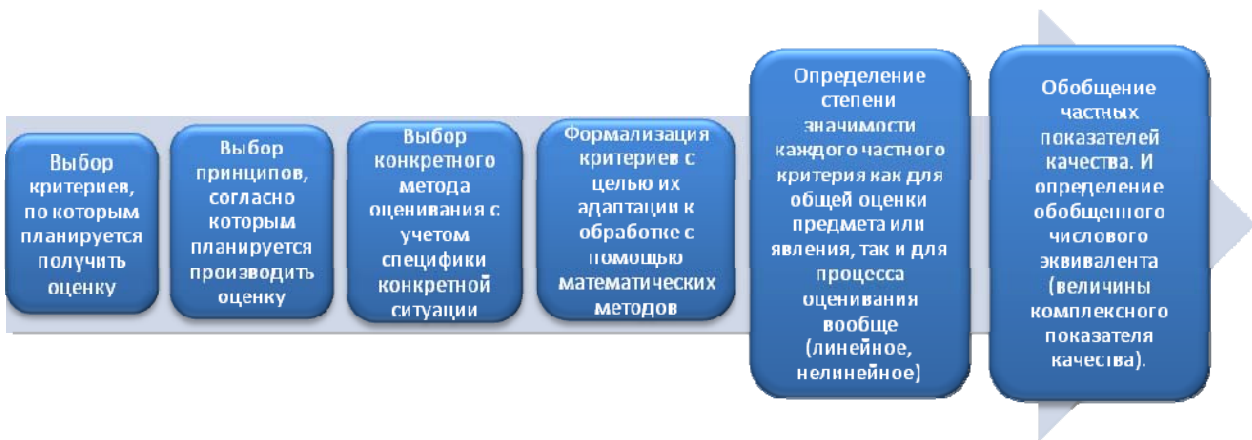


Рис. 1. Алгоритм аналитического оценивания



Рис. 2. Алгоритм экспертного оценивания

Существуют также методы экспертной оценки характеристик технических средств – методы статистики объектов нечисловой природы. Информация, которая должна использоваться для оценивания предмета или явления здесь рассматривается как случайная величина, отражением закона распределения которой является индивидуальная оценка специалиста-эксперта о достоверности или значимости того или иного предмета или явления [8]. Процесс оценивания согласно методу экспертной оценки отражает схема на рис. 2.

Это методы организации работы со специалистами-экспертами и обработки мнений экспертов, выраженных в количественной и/или качественной форме с целью подготовки информации для принятия решения лицами, принимающими решения. В процессе экспертной оценки применяются опыт, знания и интуиция специалистов, а также широко использованы методы математической статистики [8]. Хотя эти методы относят к квалиметрии, по моему мнению, экспертное оценивание, с его обработкой субъективных данных, можно отделить в особую группу квазисубъективных методов обработки информации.

## Выводы

1. Оценивание характеристик технических средств бывает аналитическим и экспертным. Оно всегда опирается на методы математической статистики.
2. Аналитическое оценивание характеристик направлено на получение такого показателя, который является следствием обобщения группы величин, однако в своей методологии часто содержит привязку к некоторой главной характеристике. Эта особенность аналитического оценивания вносит предсказуемость его результатов и, таким образом, лишает данный метод возможной большей объективности.
3. Экспертное оценивание направлено на получение показателя или численного эквивалента качественно определенной характеристики, однако в своей методологии намеренно содержит критерий субъективности. Эта особенность экспертного оценивания вносит зависимость его результатов от человеческого фактора и тоже лишает данный метод возможной большей объективности.
4. Необходимо разработать метод системного оценивания с минимальной программируемостью результатов оценивания.

## Литература

1. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров: Пер. с англ. В. С. Дуженко и Е. С. Фоминой / Под ред. и с предисл. В. Г. Горского. М.: Статистика, 1979. (Математико-статистические методы за рубежом.)
2. Федюкин В. К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции: Учебное пособие / В. К. Федюкин. М.: КНОРУС, 2009.
3. Википедия. Свободная энциклопедия. [Электронный ресурс]: Справочно-информационный интернет-портал. Электронн. дан. – «Википедия», 2010 г. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Системный\\_анализ](http://ru.wikipedia.org/wiki/Системный_анализ), свободный.
4. Основы системного анализа [Электронный ресурс] / Автор: Спицнадель В. Н. – Электрон дан. – Справочно-информационный интернет-портал «Российский гуманитарный интернет-университет», 2010 г. – Режим доступа: [http://www.i-u.ru/biblio/archive/osnovi\\_sistemnogo\\_analisa/00.aspx](http://www.i-u.ru/biblio/archive/osnovi_sistemnogo_analisa/00.aspx), свободный.
5. Основы системного анализа [Электронный ресурс] / Автор: Спицнадель В. Н. – Электрон дан. – Российский гуманитарный интернет-университет, 2010 г. – Режим доступа: [http://www.i-u.ru/biblio/archive/osnovi\\_sistemnogo\\_analisa/15.aspx](http://www.i-u.ru/biblio/archive/osnovi_sistemnogo_analisa/15.aspx), свободный.
6. Воинов Б. С. Информационные системы и технологии, 2004.
7. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002.
8. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г., Математико-статистические методы экспертных оценок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Статистика, 1980. (Матем. статистика для экономистов.)
9. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г., Экспертные оценки М.: «Наука», 1973.

# ОСНОВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗ СОСТАВА АСРК-2000™

*В. В. Снигерев, А. Г. Калимуллин*

ФГУП «Приборостроительный завод», г. Трёхгорный Челябинской обл.

## Введение

Большинство радиационно-опасных объектов на территории России (АЭС, предприятия ядерного топливного цикла, исследовательские реакторы и т. д.) оснащены аппаратурой радиационного контроля, которая успешно функционирует на протяжении нескольких десятков лет.

ФГУП «Приборостроительный завод» с 70-х годов прошлого века выполняет работы по созданию систем радиационного контроля (СРК). Сначала это была аппаратура контроля радиационной безопасности (АКРБ-03 и АКРБ-06), при создании которой ФГУП «Приборостроительный завод» выполнял роль изготовителя оборудования. Затем при создании АКРБ-08 завод выступал в качестве не только изготовителя, но и разработчика отдельных технических средств. Несмотря на высокую надежность и большие потенциальные возможности, заложенные при проектировании, возникают непреодолимые проблемы, не позволяющие продолжать эксплуатацию подобной аппаратуры. В первую очередь, это – несоответствие аппаратуры современной нормативной базе и недоступность комплектующих изделий для ее ремонта. Вместе с тем на существующих предприятиях вводятся новые объекты, требующие наращивания охвата системами радиационного контроля. Постоянно увеличивающиеся темпы строительства новых радиационно-опасных объектов требуют внедрения современных СРК.

Исходя из приведенной выше информации, а также учитывая современные тенденции построения автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), на ФГУП «Приборостроительный завод» было разработано новое поколение аппаратуры для автоматизированной системы радиационного контроля АСРК-2000. Целями создания новой СРК были:

- минимизация количества и унификация оборудования;
- увеличение функциональной насыщенности отдельных устройств;
- уменьшение массогабаритных размеров;
- сокращение объемов кабельных линий;
- увеличение гибкости системы для адаптации к любому объекту.

## Структура построения АСРК-2000

АСРК-2000 (рис. 1) была разработана на основе следующих базовых принципов:

- архитектура системы является двухуровневой (нижний и верхний уровни);
- базовым элементом нижнего уровня СРК являются «интеллектуальные» датчики и исполнительные механизмы (световые и звуковые сигнализаторы, клапаны пробоотборной арматуры и т. д.);
- связь верхнего уровня с нижним обеспечивается без промежуточного оборудования;
- каждая точка контроля должна содержать минимальное количество оборудования и нести максимальную функциональную нагрузку;
- оборудование обладает высокими надежностными характеристиками;
- оборудование соответствует требованиям действующих нормативных документов;
- предусмотрена возможность выполнения сервисных работ с оборудованием нижнего уровня с автоматизированного рабочего места (АРМ) инженерного персонала.

## Нижний уровень системы

Основные функции, реализованные в «интеллектуальных» датчиках:

- измерение радиационного параметра и формирование сигнала достоверности измерения с применением алгоритмов автоматического переключения поддиапазонов, «скользящего» среднего, линеаризации, статической и динамической компенсации, расчета статистической погрешности и т. д.;
- формирование сигналов превышения пороговых уровней;
- диагностика аппаратных неисправностей, формирование сигнала «Неисправность» и кодов неисправностей;
- управление пробоотборным оборудованием;
- энергонезависимое сохранение конфигурационных настроек и архива;
- управление тревожной светозвуковой сигнализацией, как по месту размещения, так и удаленно;

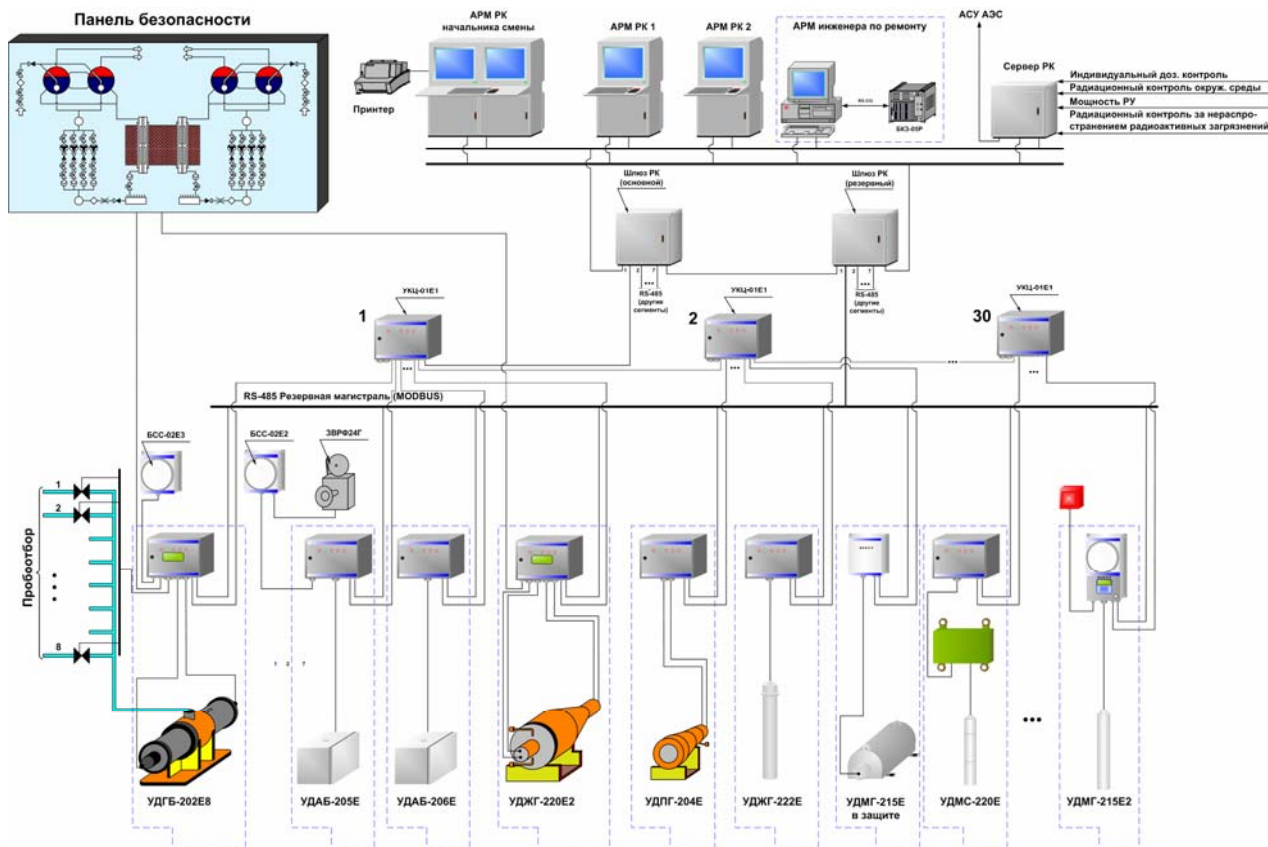


Рис. 1. Структурная схема АСПК-2000

– прием двух сигналов, передаваемых однополярным напряжением, или сигналов типа «сухой контакт»;

– выдача четырех сигналов типа «сухой контакт»;

– связь с верхним уровнем по двум интерфейсам RS-485.

Основные особенности «интеллектуальных» датчиков:

– низковольтное питание (48 В постоянного тока);

– возможность совмещения линий питания и передачи данных в одном кабеле;

– резервирование каналов электропитания;

– резервирование каналов связи;

– прямое управление пробоотборным оборудованием (до 8 каналов силовой коммутации с током до 0,5 А и напряжением до 250 В в одном устройстве);

– конфигурируемый алгоритм управления пробоотборным оборудованием;

– удаленная проверка работоспособности без использования контрольных источников излучения;

– расширенный диапазон измерения (например, для мощности поглощенной дозы гамма-излучения от  $10^{-7}$  до  $10^2$  Гр/ч).

Все перечисленные функции и особенности стали возможны, благодаря применению специалистами ФГУП «Приборостроительный завод» современной элементной базы, благодаря разработке собственного

процессорного ядра и гибкого программного обеспечения, которое позволяет легко расширять функциональные возможности системы.

## Верхний уровень системы

Подсистема верхнего уровня (ВУ) СРК (рис. 2) представляет собой набор связанных между собой программно-технических средств, выполняющих функции сбора, обработки информации, ее представления, архивирования и удаленного управления работой СРК. Базовый набор включает в себя АРМ, выполненные на базе одно- и двухмониторных пультов, шлюзы, сервера, информационные панели и коммуникационное оборудование.

Основные функции, реализованные в подсистеме верхнего уровня СРК:

– обмен информацией с нижним уровнем СРК;

– отображение информации о контролируемых радиационных параметрах, состоянии контролируемого объекта и состоянии оборудования СРК;

– прием команд операторов и обеспечение их выполнения;

– авторизованный доступ и разграничение полномочий управления.



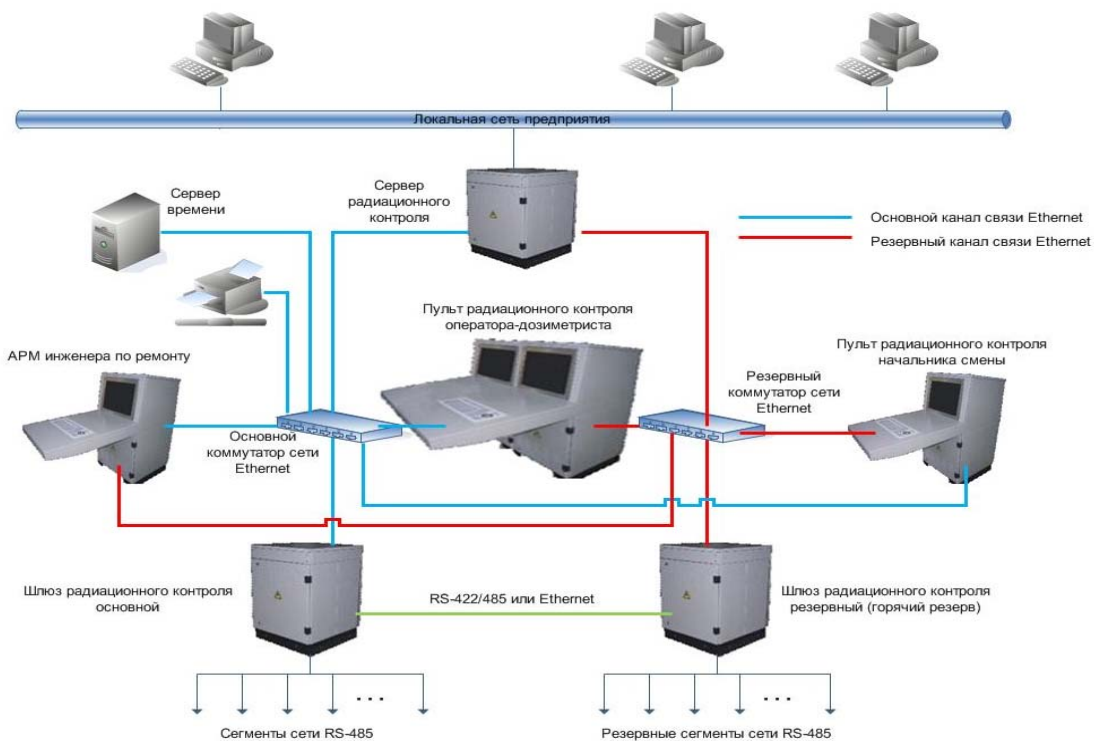


Рис. 2. Подсистема верхнего уровня СРК

- управление оборудованием нижнего уровня по заданным алгоритмам;
- формирование сообщений оператору при изменении состояния контролируемого объекта или при возникновении неисправности оборудования;
- обеспечение механизма квитирования событий операторами (подтверждение факта обнаружения события);
- архивирование информации и ведение базы данных;
- формирование отчетов установленной формы по запросу оператора;
- обмен информацией с другими информационными системами контролируемого объекта.

В состав подсистемы верхнего уровня СРК входят специализированные АРМ для выполнения диагностических работ и удаленного конфигурирования оборудования СРК. Кроме того, диагностика и конфигурирование оборудования могут быть выполнены на месте размещения оборудования, например, с помощью переносной ЭВМ.

Программное обеспечение, установленное в программно-технические средства верхнего уровня СРК, построено в соответствии со следующими принципами:

- многозадачность;
- иерархичность (различные приоритеты для задач разного уровня важности);
- гибкость (возможность быстрой перенастройки под конкретное применение);
- открытость (данные для взаимодействия между программными модулями могут представляться в

различном виде по различным протоколам), это позволяет легко интегрировать в СРК оборудование других производителей;

- надежность (процесс разработки и верификации программного обеспечения осуществлялся согласно МЭК 60880).

Программное обеспечение верхнего уровня СРК выполнено на единой программной платформе, функционирующей под управлением ОС семейства Linux, разрешенной к применению в оборудовании классов 3 и 4 по ОПБ-88/97.

В результате тесного взаимодействия с персоналом атомных станций, на которых осуществлялась интеграция оборудования, и выбранного подхода к проектированию, оборудование и программное обеспечение получили ряд дополнительных возможностей:

- модульный принцип построения прикладного программного обеспечения, который позволяет адаптировать программное обеспечение к различным структурам СРК, задачам эксплуатирующих СРК служб, а также с минимальными затратами интегрировать в СРК оборудование сторонних производителей, осуществляя, при этом, распределенную обработку информации и/или дублирование отдельных функций СРК;
- автоматическое управление переключением на резервное оборудование (режим горячего резерва);
- подсистема поддержки принятия решений для операторов СРК;
- механизм нарядов;
- ввод и хранение данных периодического радиационного контроля;

- объектная модель описания конфигурации системы (подсистема конфигурирования СРК);
- управление конфигурацией оборудования нижнего уровня;
- подсистема планирования и выполнения задач СРК.

### **Этапы построения подсистемы верхнего уровня**

Процесс построения подсистемы верхнего уровня ведется в тесном взаимодействии со специалистами организации заказчика и проектной организации. Он разделен на следующие этапы:

- получение исходных данных от заказчика или проектной организации;
- анализ исходных данных и построение объектной модели подсистемы верхнего уровня (выбор оптимального набора программно-технических средств и способа их взаимодействия);
- разработка видеокладов с использованием САПР AutoCAD;
- конфигурирование параметров устройств и заполнение объектной модели подсистемы верхнего уровня;
- разработка, при необходимости, драйверов для сбора и адаптации данных оборудования сторонних организаций;
- формирование отчетных и входных форм на основе исходных данных;
- проведение испытаний подсистемы верхнего уровня.

### **Интеграция СРК с другими автоматизированными системами**

Оборудование АСРК-2000 предоставляет возможность информационного обмена с другими автоматизированными системами объекта, как на нижнем уровне, так и на верхнем уровне.

На нижнем уровне в «интеллектуальных» датчиках реализована функция логической обработки дискретных сигналов. Данная функция позволяет формировать по заданным правилам специальные сигналы и передавать их напрямую между «интеллектуальными» датчиками или между «интеллектуальными» датчиками и смежными системами (например, для формирования сигналов управления подключенной сигнализацией, индикации состояний на щите управления, управления клапанами, газовыми и т. п.).

Информационный обмен на верхнем уровне организуется посредством сетей передачи данных с интерфейсами RS-485/422 и Ethernet.

Организация информационного обмена с АСУ ТП позволяет:

- выдавать сигналы для включения и выключения технологических блокировок;
  - выдавать информацию для выполнения расчетов и принятия решений начальниками смен смежных подсистем АСУ ТП;
  - принимать информацию для вычисления значений косвенных параметров;
  - информировать инженерный и административный персонал контролируемого объекта (энергоблока, АЭС в целом и т. п.);
  - передавать информацию о состоянии контролируемого объекта в ситуационно-кризисный центр;
  - формировать отчеты;
  - передавать информацию о возникающих неисправностях в автоматизированную систему учета дефектов для управления их устранением.
- Интеграция АСРК-2000 в АСУ ТП осуществляется посредством сервера с использованием:
- Web-технологии доступа к данным;
  - электронной почты;
  - SMS-сообщений на мобильные телефоны;
  - SQL-запросов к архиву.

### **Процесс поставки и внедрения СРК**

В процессе внедрения СРК осуществляются следующие мероприятия с участием специалистов ФГУП «Приборостроительный завод»:

- разработка технического задания (ТЗ);
- разработка проектных решений;
- разработка программно-аппаратных решений по интеграции в ВУ СРК оборудования сторонних производителей;
- разработка программно-аппаратных решений по интеграции СРК в АСУ ТП или АСУ производством (АСУП) эксплуатирующей организации;
- разработка, верификация и валидация нового уникального программного обеспечения;
- изготовление и испытания технических средств;
- формирование, верификация и валидация массива рабочих данных (с помощью подсистемы конфигурирования СРК);
- разработка эксплуатационной документации;
- автономные испытания на заводе изготовителе;
- поставка заказчику;
- монтаж и наладка;
- автономные испытания на месте эксплуатации;
- комплексные испытания СРК совместно с другими подсистемами;
- обучение специалистов эксплуатирующей организации в учебном центре;
- опытная эксплуатация;
- приемочные испытания;
- промышленная эксплуатация.

Все этапы жизненного цикла создания СРК сертифицированы в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2001(ИСО 9001:2000).

Разработка ТЗ осуществляется с привлечением специалистов заказчика и проектной организации. В качестве основы используется типовое ТЗ, в которое вносятся особенности данного проекта. На основе требований ТЗ разрабатываются проектные решения по модернизации или созданию новой СРК. При модернизации проводится анализ документации на существующую систему, анализ фактического состояния оборудования и кабельных линий связи и вырабатываются решения по оптимальному использованию существующего оборудования. При отсутствии готовых программных или аппаратных решений создаются частные ТЗ на их разработку, выполняется разработка и освоение производства новых программно-аппаратных средств. Опытные образцы технических средств проходят испытания (функциональные, климатические, сейсмические, испытания на электромагнитную совместимость), программные средства проходят верификацию и валидацию. Технические средства производятся на ФГУП «Приборостроительный завод». Весь процесс разработки и изготовления происходит под надзором постоянно действующего на предприятии отдела инспекций федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Изготовленные изделия собирают в комплекс на полигоне, где происходят окончательная отладка и валидация программного обеспечения и функциональные автономные испытания. Для отработки совместной рабо-

ты верхнего уровня СРК с другим оборудованием применяются имитаторы или фрагменты реального оборудования. После монтажа и наладки оборудования на объекте производятся автономные испытания СРК и комплексные испытания СРК с сопрягаемым оборудованием. Персонал монтажных организаций, ремонтный и оперативный персоналы эксплуатирующей организации перед началом работ проходят обучение в учебном центре ФГУП «Приборостроительный завод».

## Заключение

Описанные решения построения СРК позволяют в минимальные сроки создавать и модернизировать существующие системы радиационного контроля с максимальным удовлетворением требований заказчика. Модульная структура программного обеспечения позволяет сконфигурировать ВУ СРК, как на одном компьютере для маломасштабной системы из нескольких точек контроля, так и на десятках компьютеров для крупных систем радиационного контроля таких предприятий, как АЭС или предприятий ядерного топливного цикла. В настоящее время эти решения успешно внедрены на Ленинградской АЭС, Курской АЭС, Балаковской АЭС, ФГУП «ГХК». При этом достигнутый срок (от начала подготовки технического задания до отгрузки полностью готовых к эксплуатации программно-технических средств) – 6 месяцев.

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ (АСКТП и ТЭ)

*А. В. Савицкий, Е. В. Тарасюк*

Московский филиал «Центратомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго», Москва

Проблема энергосбережения и повышение энергетической эффективности была и остается актуальной для всей энергетической отрасли, в том числе и атомной. В связи с этим встал вопрос о разработке автоматизированной системы сбора, обработки информации и представление технико-экономических показателей (ТЭП) и тепловой эффективности энергоблоков.

В 2006 году в ОАО «Концерн Росэнергоатом» при участии ОАО «Атомтехэнерго» была разработана «Программа мероприятий по сокращению потребления тепловой и электрической энергии на собственные нужды (СН) энергоблоков АЭС», утвержденная техническим директором ОАО «Концерн Росэнергоатом» 28 ноября 2006 года. На основании этой программы, а также предложений, поступивших с атомных электростанций (АЭС), ОАО «Атомтехэнерго» совместно с ОАО «Концерн Росэнергоатом» были разработаны «Сводные мероприятия по сокращению потерь тепловой мощности и потребления электрической энергии на СН АЭС на 2007 год». В эти мероприятия была включена работа по внедрению автоматизированной системы контроля технологических параметров и тепловой эффективности (АСКТП и ТЭ). В дальнейшем «Программа мероприятий по сокращению потребления тепловой и электрической энергии на собственные нужды (СН) энергоблоков АЭС» получила поддержку на федеральном уровне. 23 ноября 2009 г. Президент Российской Федерации Д. А. Медведев подписал Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Ранее предпринимались попытки по разработке и внедрению автоматизированных систем сбора, обработки информации и представление ТЭП и тепловой эффективности энергоблоков (Балаковская АЭС, Калининская АЭС, Смоленская АЭС, Ленинградская АЭС). Работы по разработке и внедрению не завершены, методики расчета ТЭП и тепловой эффективности не унифицированы. На сегодняшний день сбор всей необходимой информации и сам расчет ТЭП осуществляются вручную или в небольших приложениях, сделанных в программе MS Office Excel, которые не упрощают задачу. На АЭС обязательными являются ежемесячные отчеты по ТЭП, выполняемые в соответствии с документом «Методические указания по составлению отчета об эффективности и

тепловой экономичности работы атомной электростанции. РД ЭО 0296-01». Эти отчеты не дают возможности оценивать эффективность работы оборудования в реальном времени.

Вопрос о создании автоматизированной системы сбора, обработки информации и представление ТЭП и тепловой эффективности энергоблоков сейчас стоит перед всеми АЭС в России. Кроме того, на АЭС назрела необходимость разработки программы по расчету и анализу ТЭП при проведении тепловых испытаний ЯППУ, турбоустановок, основных систем турбинного отделения и энергоблоков в целом.

Существует ряд проектов автоматизированных систем расчета и представления ТЭП, разработанных российскими организациями. Проекты обладают большими функциональными возможностями: расчет показателей экономичности электростанции, расчет и анализ ТЭП отдельных агрегатов и станции в целом, расчет удельного расхода условного топлива и т. д. Но существует серьезный недостаток всех этих систем – они разрабатывались на нужды тепловых электростанций, на которых успешно используются. Перевод и конфигурирование под особенности АЭС потребует немалых финансовых и временных затрат. На рынке представлены и иностранные проекты, которые внедрены и успешно используются на зарубежных АЭС. Вопрос по использованию иностранных проектов на отечественных АЭС остается открытым. Во-первых, все продукты имеют закрытый программный код. Во-вторых, обязательным условием является установка нового, более точного измерительного оборудования, монтаж которого очень дорог и сложен.

Созданием автоматизированной системы сбора, обработки информации и представление ТЭП и тепловой эффективности энергоблоков АЭС занялся Московский филиал «Центратомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго». Для внедрения АСКТП и ТЭ был выбран энергоблок № 3 Балаковской АЭС.

АСКТП и ТЭ предназначена для:

– расчета и анализа ТЭП (за заданный промежуток времени), проведения тепловых испытаний в реальном времени систем турбинного отделения, влияющих на экономичность работы турбоустановки, и анализа работы этих систем (регенеративного подогрева основного конденсата и питательной воды, промежуточной сепарации и промперегрева, конденсаторов, деаэраторов и другого оборудования);

– анализа потерь электрической мощности из-за отклонений технологических параметров систем и оборудования от условий нормальной эксплуатации;

– накопления отчетной информации по испытаниям основного оборудования турбинного отделения для разработки нормативных характеристик тепловой эффективности этого оборудования, корректировке уже существующих нормативных характеристик после модернизации оборудования;

– выполнения расчетов и формирования ежемесечных отчетов об эффективности и тепловой экономичности работы блока;

– обеспечения возможности определения качества и прогнозирования сроков ремонта оборудования.

Результаты расчета используются для:

– улучшения ТЭП станции за счет обеспечения непрерывного контроля этих показателей и повышению тепловой эффективности основного оборудования турбинного отделения;

– повышения качества управления технологическими процессами;

– определения действительного состояния основного и вспомогательного оборудования во время протекания технологического процесса;

– построения в реальном времени графиков изменения исходных и расчетных параметров;

– выявления снижения тепловых показателей и выявления причин увеличения потерь воды и тепла;

– возможности определения технического уровня эксплуатации оборудования и анализа деятельности оперативного персонала;

– выявления причин некачественного ремонта;

– выявления недостоверности показаний контрольно-измерительных приборов (КИП) по результатам расчетов и контроля балансов пара, воды, тепла и электроэнергии;

– количественного обоснования необходимости технического обслуживания и ремонта или принятия решения по модернизации оборудования;

– возможности проведения теплотехнических испытаний оборудования с целью определения его характеристик;

– получения отчетной документации о тепловой экономичности энергоблока, как для персонала АЭС, так и для составления отчетности.

Целью создания АСКТП и ТЭ являются:

– создание эффективного инструмента для оценки в реальном времени ТЭП и тепловой эффективности работы энергоблока;

– улучшение и расширение пользовательского интерфейса рабочих мест с возможностью представления различным категориям пользователей информации в виде таблиц, графиков, схем (видеокадров);

– сведение до минимума ручных операций по вводу исходных данных за счет автоматизации сбора и передачи информации в систему от источников информации;

– обеспечение накопления, длительного хранения и возможности работы с информацией, характе-

ризующей тепловую эффективность работы, как отдельного оборудования, так и АЭС в целом.

На стадии проектирования АСКТП и ТЭ формируется проектная база данных (ПБД), которая включает в себя весь объем переменных и их характеристик, требуемый для функционирования системы.

ПБД реализована на стандартной системе управления базами данных (СУБД) Microsoft Access, входящей в пакет программ Microsoft Office.

Разработка процедур ввода информации в ПБД выполнена, в основном, с помощью стандартных операций СУБД. В ряде случаев стандартные операции дополнены программами на языке Visual Basic for Applications (VBA). Информация о переменных объекта вводится в ПБД в разработанные формы ввода и коррекции, для вызова которых разработаны кнопочные формы управления ПБД (рис. 1). Все данные для переменной вводятся однократно. При наличии общих для групп переменных данных или наличии количественных ограничений данные выбираются из заранее заданных справочников. Предусмотрена возможность коррекции справочников. Ряд основополагающих величин не подлежат коррекции.

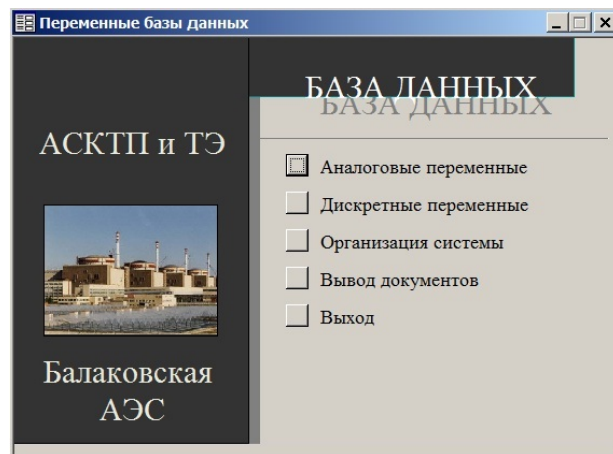


Рис. 1. Кнопочная форма управления ПБД

В состав АСКТП и ТЭ входят следующие подсистемы:

1. Подсистема сбора и подготовки данных.
2. Подсистема расчета показателей тепловой эффективности.
3. Подсистема анализа отклонений расчетных показателей.
4. Подсистема визуализации.
5. Подсистема генерации отчетов.
6. Подсистема архивирования.
7. Подсистема диагностики.
8. Подсистема настройки (редактор видеокадров, редактор шаблонов отчетов).

1. Подсистема сбора и подготовки данных.

Подсистема позволяет импортировать в АСКТП и ТЭ информацию об аналоговых и дискретных параметрах оборудования, которую формирует информационная вычислительная система энергоблока.

Подсистема выполняет следующие функции:

1) сбор данных от источников информации с периодичностью 2 секунды. Периодичность может быть уменьшена до времени опроса датчиков, при этом существует возможность ручного ввода показаний автономных и переносных датчиков, а входные данные имеют метку времени, присвоенную в источнике информации, кроме данных ручного и автоматизированного ввода, для которых метка времени привязывается к текущему системному;

2) контролируется достоверность, формируется признак достоверности и производится корректировка входных данных по признакам достоверности, установленным в источниках информации, по результатам сравнения показаний резервированных каналов и по результатам сравнения показаний технологически взаимосвязанных каналов;

3) фильтрация от пульсаций мгновенных значений технологических параметров;

4) усреднение входных данных на оперативном (15 минут), часовом, сменном (8 часов), месячном и годовых интервалах по алгоритмам усреднения.

2. Подсистема расчета показателей тепловой эффективности.

Подсистема осуществляет расчет параметров технологических сред на основе данных, подготовленных подсистемой сбора, на следующих временных интервалах: оперативном, часовом, сменном, суточном, месячном и годовом. Проводит расчет показателей тепловой эффективности с учетом режима работы энергоблока. Алгоритмы расчета формируются с помощью специального интерфейса, в котором заложены стандартные арифметические и логические операции, а также набор функций для расчета усреднения и параметров технологических сред. Интерфейс использует язык верхнего уровня, понятный персоналу технологического отдела, и позволяет создавать любые алгоритмы, необходимые для расчетов, при этом не требуются знания специальных языков программирования. Интерфейс конструктора алгоритмов представлен на рис. 2.

3. Подсистема анализа отклонений расчетных показателей.

Подсистема проводит расчет отклонений показателей тепловой эффективности от их нормативных значений.

4. Подсистема визуализации.

Подсистема позволяет получать визуальную информацию о технологических процессах в реальном времени, выводить информацию в виде графиков, сигнализировать о выходе параметров за уставки.

Видеокадры АСКТП и ТЭ разделены на следующие группы:

- 1) системные видеокадры;
- 2) технологические видеокадры;
- 3) видеокадры ручного ввода входных данных.

*Системные видеокадры* представляют собой структурные схемы технических средств АСКТП и ТЭ, которые отображают автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей с индикацией со-

стояния и режим работы серверов системы.

На *технологических видеокадрах* изображается следующее оборудование второго контура реактора ВВЭР 1000:

- регенеративная установка (ПНД, ПВД);
- система сепарации и промежуточного перегрева (СПП);
- питательные турбонасосные агрегаты (ТПН-1, ТПН-2);
- конденсационная установка (КНД);
- теплофикационная установка (ТФУ);
- турбинная установка (ЦНД, ЦВД).

На рис. 3 представлен технологический видеокадр RH02 системы регенеративного подогрева (ПНД-3). Здесь отображены:

- входная аналоговая информация, которая представляет собой значения аналоговых параметров, измеряемых на технологическом оборудовании;
- входная дискретная информация, которая представляет собой значения дискретных параметров, однозначно характеризующих положение двухпозиционных органов тепловой схемы (запорная арматура и перекачивающие механизмы).

На *видеокадрах ручного ввода входных данных* отображены параметры, к которым относятся различные характеристики оборудования, расчетные и нормативные величины, поправочные коэффициенты и др. (рис. 4).

В правой части рабочей области подсистемы визуализации находится псевдоклавиатура для вызова видеокадров и отображения групповой сигнализации. Подсистемой предусмотрены предупредительные и аварийные сигнализации при выходе параметров за пределы технологических уставок, что позволяет своевременно обнаруживать отклонения в работе. Если видеокадр активен, то на нем появится световая индикация того параметра, значения которого вышли за уставки. Если видеокадр не активен, то световая индикация появится на кнопке вызова видеокадра псевдоклавиатуры. Предупредительная сигнализация обозначена желтым цветом, аварийная – красным.

По каждому параметру на видеокадрах можно вывести краткую (рис. 5) и расширенную справки (рис. 6).

Расширенная справка предоставляет полную информацию по необходимому параметру, которая содержится в ПБД.

Изменения входных и расчетных параметров можно представить в виде графиков. Вывод графиков осуществляется в отдельное окно. В окне графиков отображаются инструментальная панель, графики и значения аналоговых или состояния дискретных переменных. На график можно вывести до 8 параметров. Значения и состояния параметров сопровождаются идентификаторами, а для аналоговых параметров – единицами измерения. При выходе отображаемого параметра за уставки сигнализации цвет его графика меняется. Кроме того, предусмотрено трехмерное изображение графиков, которое представлено на рис. 7.

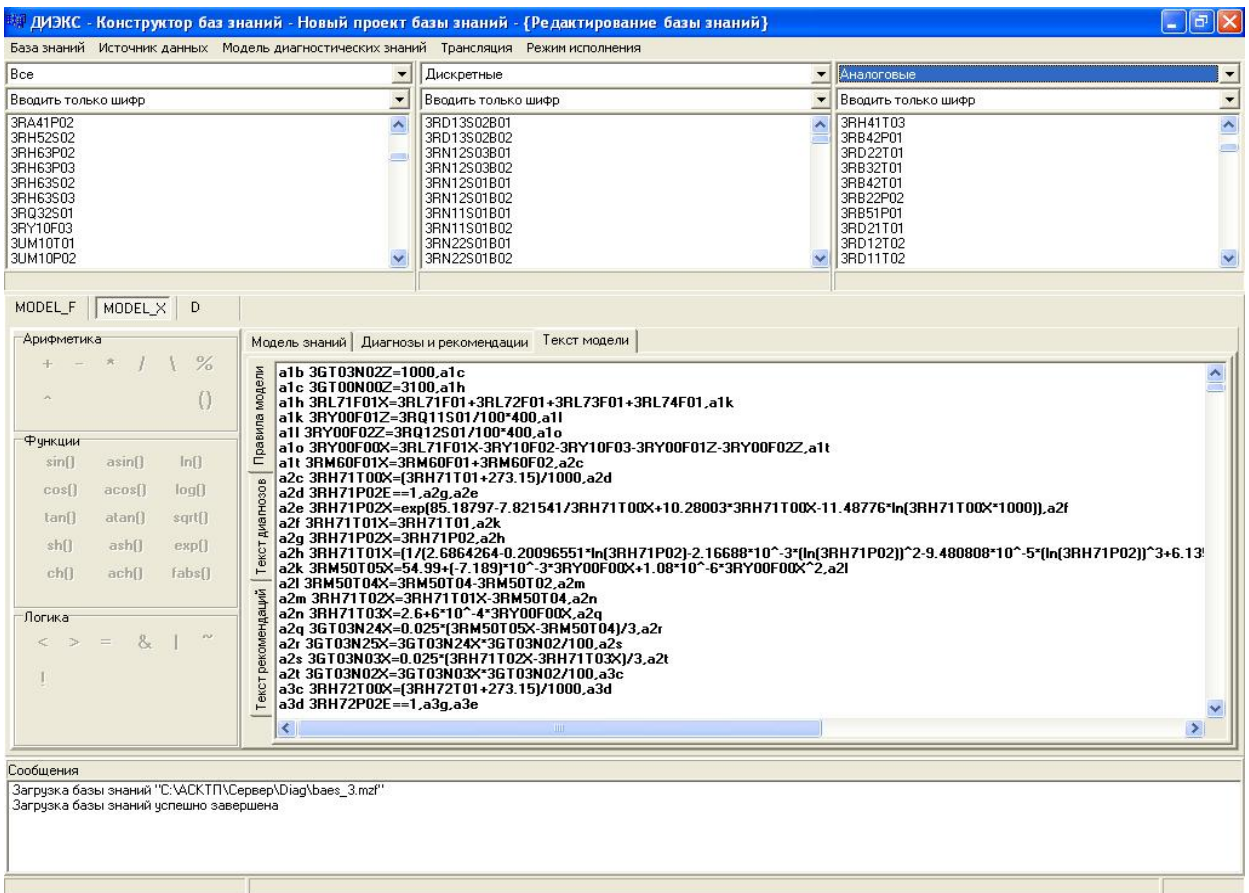


Рис. 2. Интерфейс конструктора алгоритмов

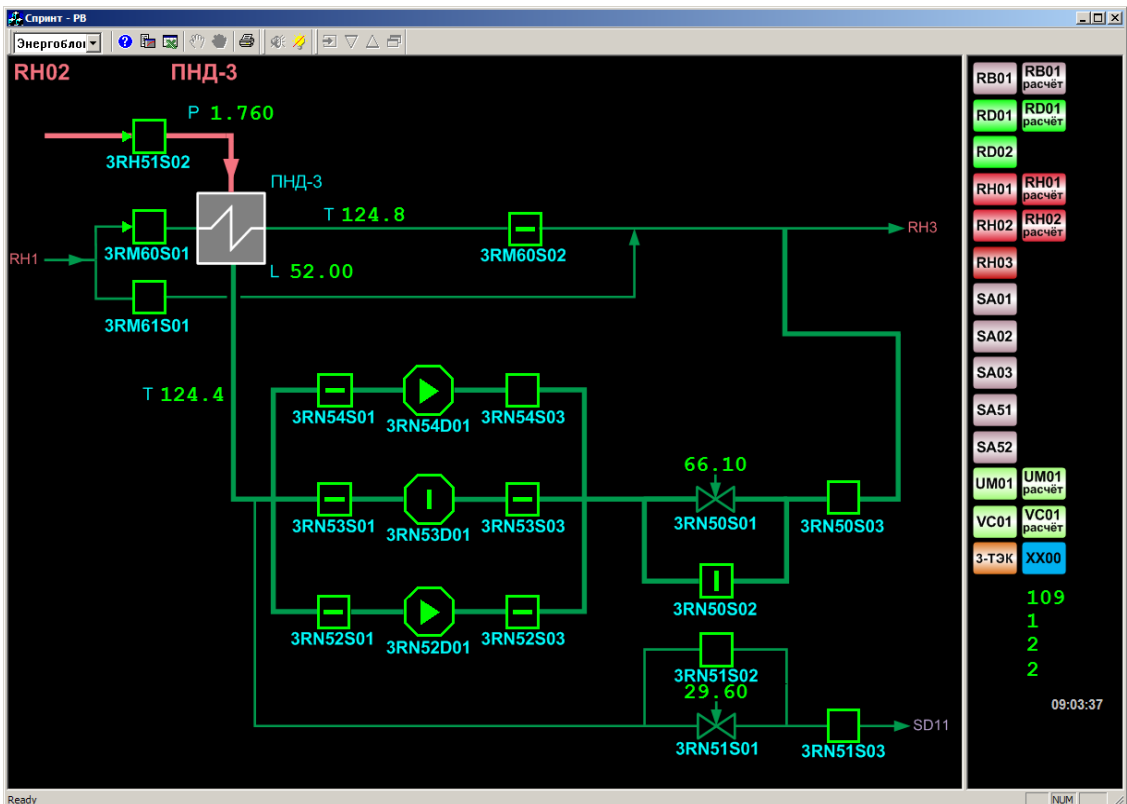


Рис. 3. Видеокадр системы регенеративного подогрева RH02





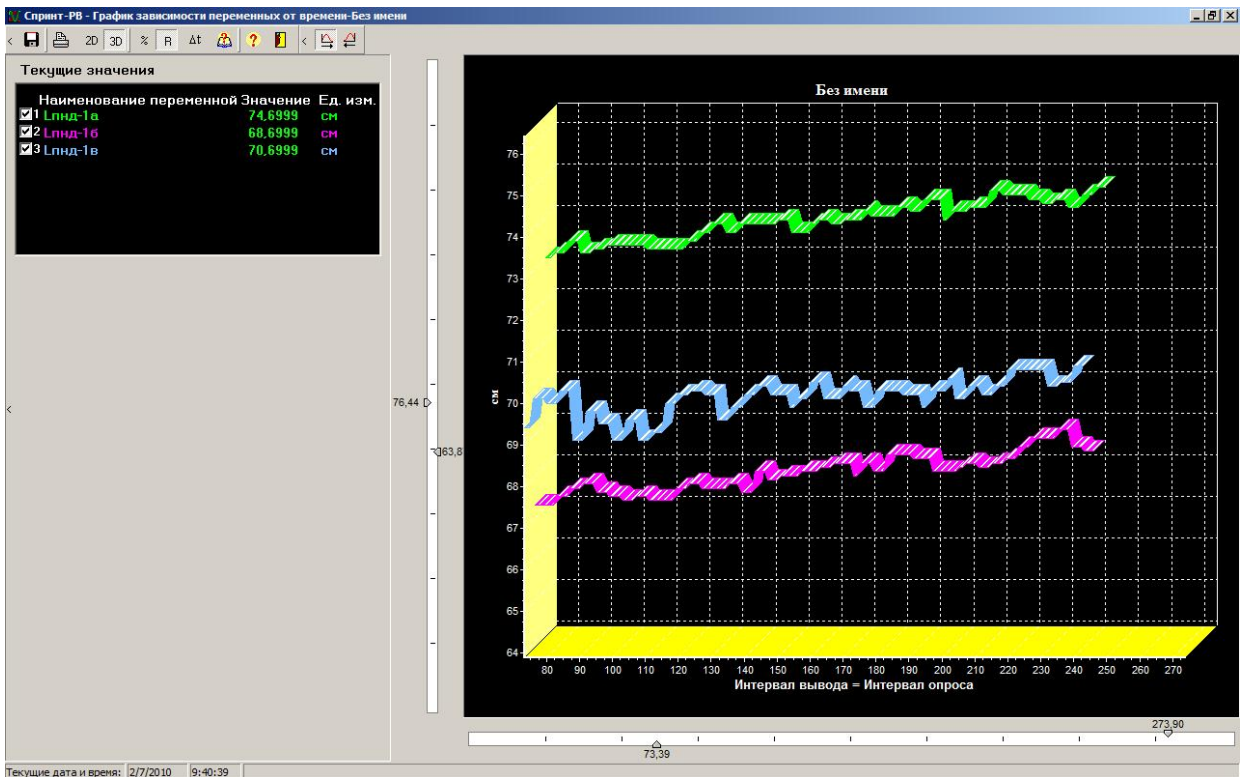


Рис. 7. Графическое представление изменения параметров во времени

#### 5. Подсистема генерации отчетов.

База шаблонов бланков предназначена для получения в процессе функционирования АСКТП и ТЭ оперативных отчетов определенной формы.

Тип бланка определяется типом хранения данных и указывается на стадии создания нового шаблона:

- 1) оперативный (данные берутся из оперативной БД);
- 2) архивный (данные берутся из архивной базы данных).

Дополнительная (справочная) информация для всех типов бланков хранится в справочной базе данных ПБД.

Тип бланка хранится вместе с шаблоном этого бланка.

Шаблон бланка формируется в таблице формата Excel.

Каждый шаблон бланка представляет файл \*.xls.

#### 6. Подсистема архивирования.

Архивирование предназначено для ведения оперативного и долгосрочного архивов данных и работы с ними. В оперативном архиве содержатся данные за фиксированный период, предшествующий текущему моменту времени. Длительность фиксированного периода определяется на стадии разработки, исходя из системных возможностей технических средств и реальной оценки информационных потоков.

Модуль хранения данных включает в себя:

- 1) приложение СУБД (Oracle), выполняющее процедуры обслуживания архивных таблиц;
- 2) модуль ведения архива;

3) модуль отображения архивных данных в виде графика;

4) интерфейс запуска отображения.

Модуль ведения архива осуществляет прием текущих значений данных из оперативной базы данных, запись их в базу данных оперативного архива посредством обращения к архивному серверу, и удаление устаревших данных из оперативного архива и перезапись данных в долгосрочный архив.

Архивируются следующие наборы данных, усредняемые на оперативном интервале (за час, смену, сутки, месяц, год): данные, подготовленные подсистемой сбора, расчетные параметры технологических сред и вспомогательные величины, показатели тепловой эффективности. Данные архивируются по каждому временному интервалу независимо друг от друга. Подсистема архивирования рассчитана на хранение входных и расчет данных не менее чем на одну топливную компанию (3 года). Более старая информация храниться на оптических носителях.

#### 7. Подсистема диагностики.

В подсистеме диагностики контролируются состояния:

- 1) технических средств системы;
- 2) программных средств;
- 3) каналов связи;
- 4) архива;
- 5) текущие подключения АРМ.

#### 8. Подсистема настройки.

Подсистема состоит из редакторов видеокладов и шаблонов.

Редактор видеокладов представляет собой инструментально-программный пакет, предназначенный для формирования видеокладов, которые отображают технологический процесс. Редактор видеокладов позволяет создавать новые видеоклады и редактировать уже существующие, а также включать готовые видеоклады в создаваемые проекты. Проект – это совокупность поименованных файлов видеокладов иерархической структуры. Все видеоклады связаны между собой ссылками, обеспечивающими их вызов.

Видеоклады создаются с использованием следующих исходных документов:

- 1) технологических эксплуатационных схем;
- 2) ПБД.

Каждый видеоклад создается с помощью следующих шагов:

- 1) формируется статический слой видеоклада (файл формата \*.bmp);
- 2) на статический слой накладываются динамические элементы (файлы формата \*.ocx);
- 3) динамические элементы связываются с переменными базы данных (файлы формата \*.mdb);
- 4) видеоклад сохраняется в виде файла формата \*.vim.

Статический слой видеоклада создается с помощью стандартных графических средств. Для создания статических элементов используется программный продукт Microsoft Office Visio.

Динамические элементы представляют на видеокладе изменяющиеся значения аналоговых измеренных и расчетных параметров, состояния дискрет-

ных и логических параметров и активные элементы, которые позволяют переходить от одного видеоклада к другому. Каждый динамический элемент представляет собой элемент пакета ActiveX (\*.ocx). Для создания динамических элементов используется среда MS Visual C++ 6.0.

Редактор видеокладов представлен на рис. 8.

Редактор шаблонов позволяет создать базу шаблонов на основе бланков, утвержденных предприятием.

Все подсистемы АСКТП и ТЭ являются настраиваемыми, что позволяет адаптировать систему под особенности промышленного объекта за короткий срок.

Внедрение АСКТП и ТЭ на энергоблок №3 Балаковской АЭС планируется завершить в четвертом квартале 2010 г. По результатам промышленной эксплуатации АСКТП и ТЭ в 2011 г. будет принято решение о дальнейшем развитии системы на всех действующих энергоблоках РФ.

Основное развитие данной системы – это создание единой системы мониторинга состояния и эффективности работы основного оборудования всех энергоблоков. Удаленный доступ Кризисного центра ОАО «Концерн Росэнергоатом», центров технической поддержки к системам мониторинга ТЭП и тепловой эффективности АЭС позволит своевременно решать вопросы по повышению эффективности работы блоков, а так же контролировать результаты проведенных работ по сокращению потерь тепловой мощности и потребления электрической энергии на СН.

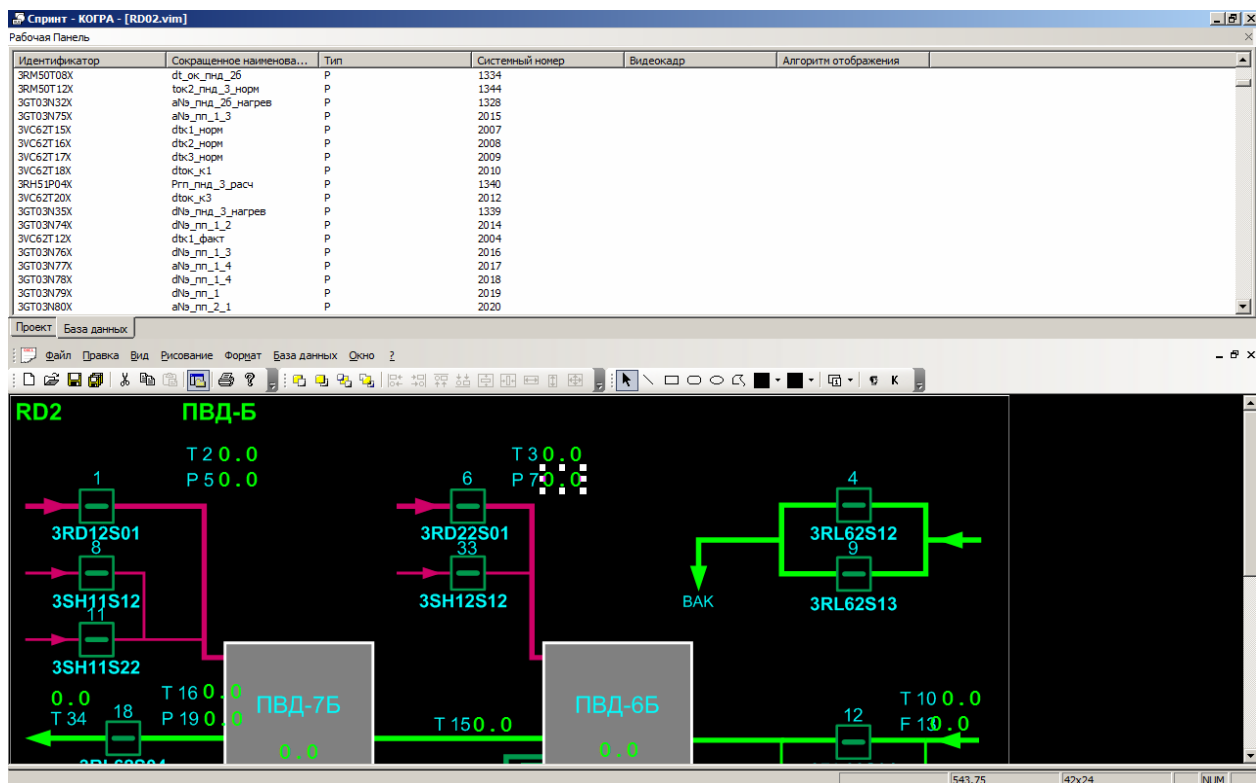


Рис. 8. Редактор видеокладов

# КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИСПЫТАНИЯ И ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*Б. В. Доровских, В. В. Люльчак, В. В. Малышев, Д. С. Уваров, Е. В. Феоктистова*

Московский филиал «Центратомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго», Москва

«Энергетическая стратегия России на период до 2030 года», утвержденная распоряжением правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г., предусматривает увеличение темпов развития и упрочнение позиций атомной отрасли на мировых рынках. Развитие, в свою очередь, невозможно без условия повышения эффективности и конкурентоспособности атомной промышленности и выхода её на мировой рынок возведения атомных электростанций (АЭС). При этом повышение общей эффективности отечественной атомной отрасли зависит, в том числе, от повышения показателей качества проектирования, разработки и внедрения Автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) АЭС.

## 1. Усовершенствование проектирования АСУ ТП АЭС

Одним из направлений развития атомной промышленности является усовершенствование процесса проектирования, создания и ввода в эксплуатацию АСУ ТП для АЭС. Основные концепции подготовки АСУ ТП к установке на АЭС требуют пересмотра существующих методов и разработки новых методов проектирования, испытания и внедрения АСУ ТП АЭС.

Выделим основные направления развития, целью которых является усовершенствование процесса создания и внедрения АСУ ТП АЭС:

– увеличение степени готовности оборудования АСУ ТП, поставляемого на площадку АЭС, к осуществлению наладки и монтажа данного оборудования за счет согласованного и утвержденного планирования ведения работ по созданию и внедрению АСУ ТП и согласованной работы организаций, участвующих в создании и внедрении АСУ ТП;

– снижение времени проектирования АСУ ТП за счет применения единых принципов разработки технологического задания (ТЗ), задания заводу-изготовителю (ЗЗИ) программного технического комплекса (ПТК), использования в процессе проектирования автоматизированных систем проектирования;

– общее снижение затрат на создание и ввод в эксплуатацию АСУ ТП за счет параллельного веде-

ния этапов проектирования ПТК различных подсистем АЭС;

– повышение качества конечного продукта за счет применения инновационных подходов при проектировании и создании АСУ ТП.

Корректировка и устранение замечаний к оборудованию АСУ ТП до этапа внедрения ПТК/подсистем АСУ ТП на АЭС позволяет снизить время внедрения проекта АСУ ТП на площадке АЭС.

Проект АСУ ТП содержит значительное количество алгоритмов технологических защит, блокировок и сигнализации (ТЗБиС), систем автоматического регулирования (САР) (например, в системе контроля и управления турбинным отделением (СКУ ТО) более 900 алгоритмов ТЗБиС, САР).

Алгоритмы влияют на исполнительные механизмы (ИМ) в различных подсистемах АСУ ТП АЭС. Каждая подсистема отвечает за определенный технологический процесс и требует высокой надежности и качества выполнения работ, как от разработчиков АСУ ТП, так и от персонала, эксплуатирующего АЭС.

В целях обеспечения указанного требования для проекта создания АСУ ТП АЭС используется концепция, основанная на применении современных подходов к проектированию и изготовлению оборудования АСУ ТП, и на использовании опыта ввода в эксплуатацию АСУ ТП действующих АЭС в России и за рубежом.

Как представлено на рис. 1, этапы проекта создания АСУ ТП по своему назначению условно подразделяются на три вида.

1. Управление – этап, связанный с созданием структуры управления проектом, который предназначен для обеспечения процесса создания АСУ ТП проектными функциями планирования, организации и контроля.

2. Основные этапы – этапы, направленные на достижение поставленных целей и выполнение главных задач проекта создания АСУ ТП.

3. Вспомогательные этапы – этапы, обеспечивающие качественное выполнение основных этапов создания АСУ ТП, а также интеграцию компонентов АСУ ТП в единое целое.

Концепция отражает метод управления проектом, который позволяет организовать эффективное взаимодействие между участниками проекта созда-

ния АСУ ТП, а также установить требования к исходному и конечному состояниям каждого этапа испытаний. Проект создания и испытаний АСУ ТП АЭС представляет собой совокупность упорядоченных во времени, взаимосвязанных, объединенных в стадии и этапы работ. Выполнение вышеприведенных работ (рис. 1) необходимо и достаточно для создания системы, соответствующей требованиям по поставке оборудования на площадку АЭС.

Очевидным является тот факт, что чем на более раннем этапе проектирования найдена и локализована ошибка, тем проще ее устранить, с наименьшими финансовыми и временными затратами. Таким образом, основной идеей, закладываемой в Концепцию современного подхода к проекту создания ПТК подсистем и АСУ ТП, является введение в процесс создания дополнительных этапов испытаний. Они оказывают вспомогательную функцию для основных этапов создания и за счет использования прогрессивных и интегрированных методов анализа позволяют достигать максимальных результатов в корректировке проекта разработки АСУ ТП, поиске и устранении ошибок на всех этапах создания АСУ ТП (рис. 1).

## 2. Организация и выполнение Концепции создания и испытаний АСУ ТП

Выполнение этапов Концепции создания и испытаний АСУ ТП имеет определенную последовательность. Процедура перехода от этапа к этапу, условия начала и окончания каждого этапа представлены на рис. 2.

Рассмотрим подробнее этапы проектирования и взаимодействия между основными и вспомогательными этапами.

### 2.1. Разработка технологического задания подсистем АЭС

Этап разработки ТЗ подсистем АЭС является основным этапом проектирования АЭС и выполняется Генеральным проектировщиком АЭС. Результатом работы на этом этапе является ТЗ, включающее в себя состав основного технологического оборудования, точки контроля, алгоритмы управления и взаимодействия между собой различных элементов и ИМ АСУ ТП.

### 2.2. Верификация технологического задания подсистем АЭС

Этап верификации ТЗ является вспомогательным этапом и следует за этапом разработки ТЗ. Под верификацией понимается подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что разработанное ТЗ референтно с аналогичными проектами АЭС в России и за рубежом. Кроме этого, на этапе верификации проверяется общая целостность проекта, взаимосвязь отдельных подсистем проекта АСУ ТП между собой.

Проведение работ по этапу верификации начинается после выхода «нулевой» редакции технологического задания подсистем АСУ ТП. Выполнение работ по этапу возможно выполнять по мере готовности технологического задания на отдельные подсистемы АЭС.

По результатам проведения верификации принимается решение о корректировке технологического задания подсистем АЭС. После чего этап верификации повторяется снова.

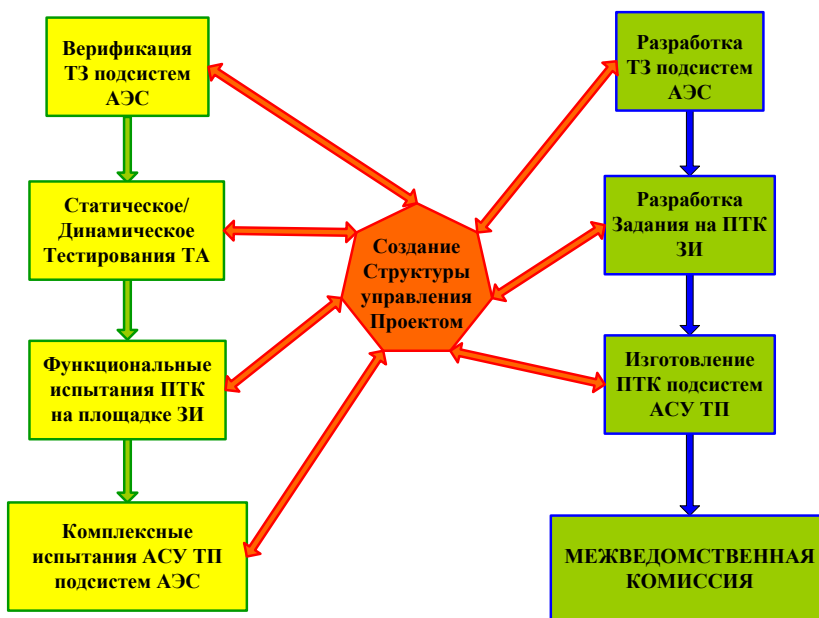


Рис. 1. Структура этапов создания АСУ ТП по назначению

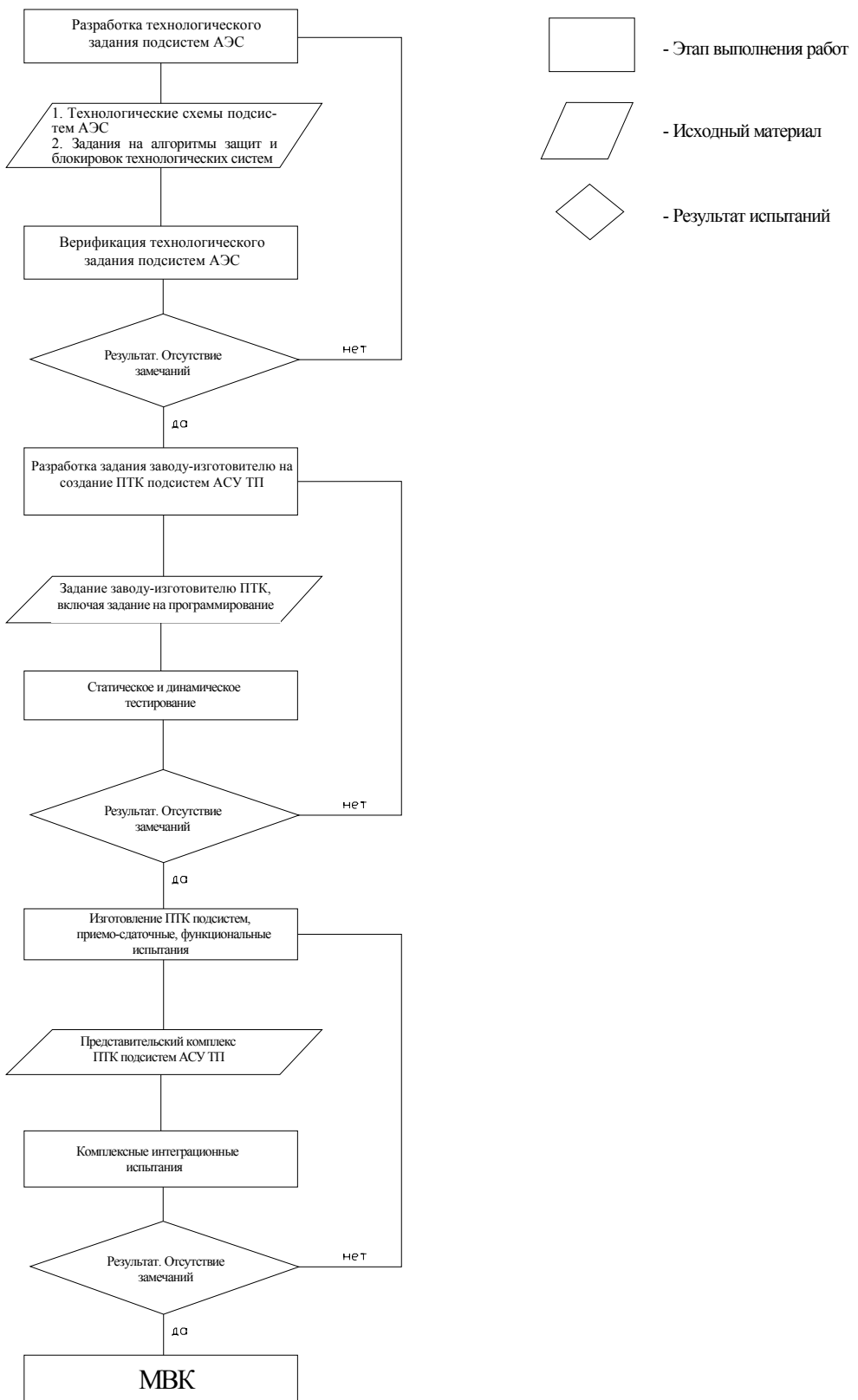


Рис. 2. Последовательность выполнения концепции создания и испытаний АСУ ТП

### **2.3. Разработка технического задания заводу-изготовителю на создание ПТК подсистем АСУ ТП**

Этап разработки технического задания заводу-изготовителю (ЗЗИ) на создание подсистем АСУ ТП АЭС является основным этапом.

Рассмотрим этап разработки задания заводу-изготовителю.

Во время работы над заданием ПТК соответствующей подсистемы АЭС применяется структурированная система проектирования.

Основные этапы ее следующие:

- 1 этап – анализ исходных данных;
- 2 этап – разработка документации для проектирования ПТК подсистем АСУ ТП;
- 3 этап – разработка базы данных ПТК подсистем АСУ ТП;
- 4 этап – разработка технологического задания в формализованном виде на ПТК подсистем АСУ ТП;
- 5 этап – разработка задания заводу-изготовителю ПТК подсистем АСУ ТП.

2.3.1. Первый этап проектирования ПТК соответствующей подсистемы АСУ ТП «Анализ исходных данных» включает в себя получение и обработку исходных данных по контрольно-измерительным приборам (КИП), ИМ, входящих в состав ПТК подсистемы, и технологическим алгоритмам (ТА).

2.3.2. В период второго этапа «Разработка документации для проектирования ПТК подсистем АСУ ТП» специалисты разрабатывают документацию, необходимую для проектирования ПТК подсистем АСУ ТП.

2.3.3. Для компоновки исходных данных, поиска интересующих сигналов, КИП и ИМ, алгоритмов ТЗБиС и САР технологических систем и схем подключения на третьем этапе разрабатывается «База данных» в соответствии с требованиями к ней по содержанию. В соответствии с инструкцией по кодированию, каталогом схем подключений и каталогом типовых решений каждому элементу в базу данных (БД) соотносится соответствующая схема подключения и типовой алгоритм.

2.3.4. Четвертый этап. «Технологическое задание в формализованном виде ПТК подсистем АСУ ТП» разрабатывается по результатам и обработанным данным выше перечисленных этапов. Это один из важнейших этапов проектирования, т. к. на этом этапе словесное описание технологических алгоритмов преобразуется в структурные схемы, построенные на стандартных функциональных блоках и распределенные согласно технологическим системам объекта.

Этап проектирования ТЗ в формализованном виде реализован для упрощения и ускорения представления, понимания, обработки, анализа и модернизации ТЗ согласно технологии и эксплуатации ПТК подсистем АСУ ТП АЭС.

2.3.5. На пятом этапе разрабатывается и передается «Задание заводу-изготовителю ПТК подсистем АСУ ТП.

Задание заводу-изготовителю включает в себя следующую документацию:

- база данных ПТК СКУ ТО;
- компоновка шкафов ПТК, определяется Базой данных, в которой указано в каком шкафу, какой модуль и в каком количестве должен быть установлен;
- общие виды шкафов ПТК, составляются в соответствии с документом, определяющим компоновку шкафов;
- заявочная спецификация на ПТК;
- схемы внутрисистемных соединений;
- схемы внешних соединений шкафов ПТК (включая кроссовые шкафы);
- технологическое задание в адаптированном виде.

Завод-изготовитель (ЗИ) производит компоновку шкафов, разработку кроссовых приборных стоек, стоек промреле.

Согласно заданию на общие виды шкафов ПТК СКУ ТО завод производит заполнение стоек модулями согласно указанным в задании физическим адресам.

Адаптированные алгоритмы разрабатываются в среде графического проектирования и представляют собой планы ТЗБиС и САР подсистемы в виде максимально приближенном к планам, которые используются при программировании ПТК. Данные алгоритмы выполняются в соответствии с каталогом типовых решений, основываясь на алгоритмах, выполненных в формализованном виде.

Данный этап позволяет привлечь для программирования ПТК и создания программного проекта узкоспециализированный персонал завода-изготовителя, не владеющий знаниями в области технологических процессов, что сокращает время на разработку программного проекта и параметрирование ПТК.

Заключительным этапом проектирования является этап программирования ПТК – разработка проекта в среде автоматического проектирования ПТК. На данном этапе завод-изготовитель, основываясь на адаптированных алгоритмах, создает проект для параметрирования ПТК.

### **2.3. Статическое и динамическое тестирование алгоритмов**

Этап статического и динамического тестирования алгоритмов является вспомогательным этапом. Исходным материалом для начала работ являются технические задания или задания заводу-изготовителю на ПТК, включая задания на программирование ПТК подсистем АСУ ТП.

На этапе статического и динамического тестирования ПТК подсистем АЭС проводится тестирование алгоритмов ТЗБиС, САР, функций управления ИМ, функций приема, передачи и обработки сигнала.



лов от первичных преобразователей (ПП), функционально-группового управления (ФГУ) ИМ с помощью прикладного программного обеспечения.

Тестирование проводится с целями:

– подтверждения корректности программной реализации алгоритмов ТЗБиС и САР, реализованных в ПТК подсистем АЭС;

– анализа выполнения функций, установленных требований в ПТК.

Объектом статического тестирования является интегрированная математическая модель технологических алгоритмов, повторяющих технологические алгоритмы ПТК подсистем АСУ ТП, реализованная на специализированном программном обеспечении. Статическое тестирование проводится на персональном компьютере с установленным программным обеспечением, отсутствует необходимость в специально оборудованном рабочем месте для имитации задействованных сигналов в технологических алгоритмах.

Статическое тестирование проводится в границах ПТК подсистем АСУ ТП по заранее утвержденным программам и методикам статического тестирования технологических алгоритмов ПТК соответствующих подсистем АЭС. Программы тестирования разрабатываются на основании базы данных (БД): исходных данных, технологических схем и ТЗ.

Во время статического тестирования имитируются все задействованные в проверяемом алгоритме сигналы и состояния ИМ, например, сигналы от ПП, достоверность сигнала от ПП, параметры блока регулирования, включение/отключение насоса, двигателя, закрытие/открытие задвижки, включение регулирующего клапана (РК) в режим автоматического/дискретного управления, работу дискретных блоков установки.

Сигналы, приходящие в алгоритмы испытываемого ПТК системы контроля и управления (СКУ) подсистемы АЭС из алгоритмов смежных ПТК подсистем АЭС АСУ ТП, имитируются программным путем. Сигналы, передаваемые в другие ПТК, контролируются на границе тестируемого ПТК подсистемы АСУ ТП.

Обработка результатов тестирования проводится на основании визуального контроля логики формирования ТЗБиС, САР, индикации положения ИМ, ФГУ, анализа протоколов программного обеспечения (распечатки контролируемых параметров и сигналов алгоритмов технологических защит и блокировок, САР).

По окончании работы формируется отчет о проведении статического тестирования программно реализованных ТА проверяемой подсистемы АЭС и рассылается его разработчикам и в заинтересованные организации.

Таким образом, при проведении статического тестирования ТА формируются рекомендации к реализации ТА.

Объектом динамического тестирования являются ТА ПТК подсистем АСУ ТП, интегрированные в математическую модель энергоблока.

При динамических испытаниях проверяется логика и корректность функционирования технологических алгоритмов АСУ ТП в динамических режимах работы энергоблока, при этом появляется возможность оценить влияние действий конкретных защит и блокировок на ход технологического процесса соответствующей подсистемы.

По итогам проведения тестирования принимается решение о корректировке ТА, ТЗ, ЗЗИ. После внесения корректировок принимается решение о необходимости проведения повторного статического и динамического тестирования в части внесенных изменений для проверки их корректности. Цикл повторяется до полного устранения всех выявленных замечаний.

Введение этапа статического и динамического тестирования позволяет устранить значительное количество замечаний, которые ранее могли быть устранены только лишь при испытаниях на заводе-изготовителе или при проведении пуско-наладочных работ (ПНР), и значительно уменьшить время последующих испытаний на заводе-изготовителе и при проведении ПНР.

На данном этапе для сокращения временных затрат возможно параллельное ведение статического и динамического тестирования.

#### **2.4. Изготовление ПТК подсистем АСУ ТП и заводские приемо-сдаточные испытания**

Этап изготовления и заводских приемо-сдаточных испытаний ПТК подсистем АСУ ТП АЭС является основным этапом. На нем происходит изготовление ПТК АСУ ТП в соответствии с разработанными ТЗ и ЗЗИ, после чего оборудование АСУ ТП проходит испытания на заводе-изготовителе, где проверяется работоспособность изготовленных элементов и оборудования АСУ ТП. Осуществляется проверка измерительных каналов, типовых функций, реализованных в программных модулях.

По итогам проведения заводских приемо-сдаточных испытаний устраняются замечания к оборудованию, входящему в состав АСУ ТП, после чего проводятся повторные испытания. По результатам испытаний заполняется журнал несоответствий.

На этапе заводских приемо-сдаточных испытаний осуществляется подтверждение способности ПТК выполнять свои функции в условиях, предусмотренных проектом. На этапе заводских испытаний выполняется проектное подключение функциональных стоек, стоек шлюзов сопряжения. Данный этап является подготовительным для этапа функциональных испытаний.

## 2.5. Функциональные испытания на площадке завода-изготовителя

На этапе функциональных испытаний помимо проверки корректности реализации ТА в ПТК соответствующей подсистемы реализуется также проверка следующих специфических функций ПТК:

- корректность применения циклов обчета (от типа цикла зависит скорость и последовательность обработки программной логики внутри самого алгоритма и передача/прием сформированных аналоговых и дискретных сигналов между модулями);
- корректность установки программно реализованных ТА в функциональный модуль;
- использование специфических операндов (с запоминанием/без запоминания текущего значения сигнала в алгоритме при смене типа основного/резервного модуля);
- параметризация программных модулей оборудования для отображения сформированных ими сигналов на систему верхнего блочного уровня (СВБУ);
- применение кодов важности для распределения сигналов на сигнализацию, отображения на СВБУ и функции архивирования;
- отображение/архивация на имитаторе СВБУ аналоговых, дискретных и событийных сигналов;
- скорость передачи/приема сигналов оповещающей информации на СВБУ;
- корректность программного формирования сигналов сообщений для передачи между функциональными стойками и на имитатор СВБУ.

Данные особенности ПТК не отображаются на этапе статических и динамических испытаний.

На площадке тестирования разрабатываемого ПТК подсистемы АСУ ТП используется следующее оборудование:

- ПТК соответствующей подсистемы (стойки питания, функциональные стойки с программируемыми модулями, стойки шлюза сопряжения);
- имитаторы задвижек, РК, двигателей, соленоидных клапанов, дискретных сигналов;
- имитатор аналоговых сигналов;
- программаторы (для контроля и имитации программных операндов);
- имитатор СВБУ.

В программные модули функциональных стоек устанавливается программная реализация ТА соответствующей подсистемы АЭС, реализованная в соответствии с ЗЗИ.

Иницирующие воздействия из алгоритмов: технологических защит блокировок (ТЗБ), САР контролируются с помощью имитаторов ИМ, программатора и имитатора СВБУ.

Имитаторы оборудования подключаются к программным модулям в соответствии с проектной схемой соединения.

На СВБУ проверяется наличие, отображение и работа окон управления оборудованием, информационных окон, окон сигнализации и отображение требуемых сигналов системы отделения АЭС.

Функциональные испытания проводятся по заранее разработанным и утвержденным программам и методикам функциональных испытаний. Программы и методики испытаний разрабатываются на основании БД: исходных данных, технологических схем, технологического задания и задания заводу-изготовителю ПТК соответствующих подсистем с учетом используемого оборудования на площадке испытаний ПТК подсистемы АСУ ТП АЭС.

По окончании проведения этапа функциональных испытаний на имитаторе СВБУ снимается архив о проведенной работе, где отображены закодированные сигналы и алгоритмы согласно инструкции кодирования сигналов в ПТК подсистем, изменения сигналов ПП, сформированных дискретных и аналоговых сигналов в технологических алгоритмах, изменение уставок, сообщения о неисправностях, срабатывании алгоритмов ТЗБиС, САР.

По итогам функциональных испытаний формируется отчет с указанием замечаний и рекомендации к их устранению. Отчет передается в адрес всех заинтересованных организаций. После устранения замечаний функциональные испытания повторяются в части внесенных изменений.

Цикл, как и на предыдущих этапах, повторяется до полного устранения всех выявляемых замечаний.

Этап функциональных испытаний является подготовительным для этапа комплексных интеграционных испытаний.

## 2.6 Комплексные интеграционные испытания ПТК подсистем АСУ ТП АЭС

Комплексные интеграционные испытания являются завершающим этапом испытаний подсистем, входящих в состав АСУ ТП. Основной идеей введения этого этапа является комплексное опробование подсистем АСУ ТП в условиях моделирования режима эксплуатации оборудования АСУ ТП.

При интеграционных испытаниях используются модели смежных подсистем АСУ ТП, программные имитаторы ИМ, представительская часть СВБУ. В рамках общеклочной математической модели проверяется вся логика работы комплекса АСУ ТП от иницирующего сигнала (первичного преобразователя) до реакции исполнительного механизма, прохождение программных сигналов между отдельными частями АСУ ТП.

Таким образом, проведение комплексных интеграционных испытаний ПТК подсистем АСУ ТП АЭС в условиях моделирования режима эксплуатации оборудования АСУ ТП позволяет выявить и устранить замечания связанные с программной реализацией формирования сигналов, их передачей в пределах подсистем и СВБУ.

По итогам проведения комплексных интеграционных испытаний формируется отчет с указанием

замечаний и рекомендаций к их устранению. После корректировки оборудования, входящего в состав АСУ ТП, проводятся повторные испытания. Цикл, как и на предыдущих этапах, повторяется до полного устранения всех выявляемых замечаний.

Все интеграционные испытания АСУ ТП АЭС сводятся к проверке готовности оборудования для его размещения и внедрения в эксплуатацию на площадке АЭС.

## **2.7 Межведомственная комиссия по приемке АСУ ТП**

Заключительным этапом, при необходимости, является проведение межведомственной комиссии (МВК) по приемке АСУ ТП. Члены комиссии по итогам проведения комплексных интеграционных испытаний принимают решение о готовности АСУ ТП АЭС.

## **3 Общие выводы**

Предложенная концепция позволяет значительно увеличить степень готовности конечного продукта, повысить его качество перед этапом пусконаладочных работ. Введение новых этапов испытания ПТК, контроля при проектировании и вводе в эксплуатацию позволяет:

– значительно снизить время разработки проекта АСУ ТП за счет оптимизации структуры управления проектом АСУ ТП;

– снизить общие затраты на проектирование, создание и ввод в эксплуатацию АСУ ТП за счет введения инновационных подходов к проектированию.

Распределение проектирования, создания и внедрения АСУ ТП по этапам дает возможность ведения четко структурированных параллельных и последовательных работ различными организациями, объединенными одной целью – внедрение качественной АСУ ТП АЭС.

Участие в проектировании, разработке и внедрении АСУ ТП АЭС узкоспециализированных высококвалифицированных работников различных организаций позволяет на вспомогательных этапах проектирования и создания АСУ ТП АЭС выявить, устранить замечания и откорректировать технологическое задание, задание на ПТК, задание заводу-изготовителю СКУ, разработанное ПТК или оборудование СКУ.

Таким образом, общая работа различных организаций и проведение верификации технологического задания, статического и динамического тестирования технологических алгоритмов в ПТК, комплексных интеграционных испытаний СКУ АЭС позволяет повысить качество и надежность перед этапом внедрения АСУ ТП на площадку АЭС. А также позволяет повысить качество и надежность при проектировании технологических заданий, ПТК подсистем и СВБУ АСУ ТП.

В дальнейшем необходимо и целесообразно развивать и все более широко внедрять современные подходы при проектировании АСУ ТП.

## СИСТЕМА ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПАКТНОЙ СУПЕР-ЭВМ

*С. Н. Шлыков, Н. А. Дмитриев, В. И. Игрунов, В. Н. Лаиманов, В. Н. Стрюков, А. В. Шатохин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В июле прошлого года в г. Саров в ходе визита президента РФ состоялось выездное заседание Комиссии при Президенте РФ по вопросам модернизации и технологического развития экономики. На нем было определено стратегическое направление развития суперкомпьютерных и грид-технологий. В этих рамках ВНИИЭФ занимается разработкой базового ряда супер-ЭВМ и отечественного программного обеспечения (ПО) для комплексного имитационного моделирования на супер-ЭВМ. Одним из направлений этих работ является создание компактных супер-ЭВМ (далее КС-ЭВМ). ВНИИЭФ в апреле этого года завершил разработку КС-ЭВМ производительностью 1 Тфлопс.

Были сформулированы основные требования:

- КС-ЭВМ должна быть универсальной;
- пиковая производительность 1 Тфлопс;
- скорость межпроцессорных обменов 20 Гбит/с;
- потребляемая мощность в пределах от 1,5 до 4 кВт;

- круглосуточный режим работы;
- акустический уровень шума не более 50 дБА.

Результатом разработки является полнофункциональный программно-аппаратный комплекс для высокопроизводительных вычислений на базе универсальной КС-ЭВМ, не требующей при своей эксплуатации специальных инженерных систем. В таблице приведены технические характеристики КС-ЭВМ.

В КС-ЭВМ используется три материнские платы SuperMicro H8QG6. На каждой плате установлено четыре двенадцатиядерных процессора AMD Mangy Cours. Пиковая производительность КС-ЭВМ составляет 1.1 Тфлопс. Для хранения информации на каждую материнскую плату устанавливается 2 HDD диска объемом 2 Тбайта каждый и один SDD диск объемом 60 Гбайт для операционной системы. В качестве среды межпроцессорных обменов используется DDR (QDR) Infiniband 4x с пропускной способностью 40Гбит/с. Для подключения к пользовательской сети используется Gigabit Ethernet.

Современные компьютеры становятся всё более производительными. Вместе с тем, растёт количество выделяемой теплоты различными компонентами компьютера. Высокая температура представляет реальную угрозу работоспособности компьютера. Поэтому, системам охлаждения уделяется всё больше внимания. Эти системы постоянно совершенствуются. Необходимо было выбрать, каким способом будут охлаждаться компоненты КС-ЭВМ.

### Технические характеристики КС-ЭВМ

Теоретическая пиковая производительность	1.1 ТФлопс
Количество вычислительных ядер	144 шт.
Максимальный объем оперативной памяти	152 (до 1536) Гбайт
Емкость дисковой памяти	12 (до 24) Тбайт
Операционная система	Linux
Акустический уровень шума	48дБА
Габариты (В x Ш x Г)	645 x 330 x 725 мм
Вес	60 кг
Количество материнских плат и процессоров на плате	3шт./ 4шт.
Система охлаждения процессоров	Жидкостная
Система межпроцессорных обменов	InfiniBand QDR
Сеть управления и мониторинга	Ethernet
Подключение к локальной сети предприятия	Gigabit Ethernet
Система шумоподавления	Пассивная
Электропитание	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	2.43 кВт

На сегодняшний день в компьютерной индустрии существует несколько вариантов охлаждения. Рассмотрим основные систем охлаждения:

- воздушное охлаждение;
- охлаждение с применением тепловых труб;
- азотное охлаждение;
- фреоновое охлаждение;
- жидкостное охлаждение.

Каждая из представленных систем обладает своими достоинствами и недостатками.

### Воздушная система охлаждения

Воздушная система охлаждения является наиболее распространенным вариантом охлаждения. На процессор устанавливается кулер – радиатор с вентилятором. Тепло от процессора передается радиатору, который охлаждается вентилятором. При таком способе охлаждения хладагентом является окружающий воздух.

Современные кулеры при работе создают шум на уровне 23 дБА. При увеличении количества кулеров в корпусе уровень шума постепенно возрастает.

Для охлаждения процессоров КС-ЭВМ потребуется 12 кулеров. Кроме процессоров необходимо охладить чипсет и оперативную память. В итоге на охлаждение КС-ЭВМ потребуется более 20 вентиляторов, чей суммарный уровень шума будет превышать 50 дБА.

Также стоит учесть, что на момент создания АПК-1, на рынке воздушного охлаждения не было кулеров для нового сокета AMD – g34.

12 ядерный процессор Magny Cours крупнее предыдущих процессоров. Кулеры, сделанные для других сокетов, не закрывают процессор полностью.

## Охлаждение с применением тепловых труб

Тепловая труба представляет собой пассивное герметичное двухфазное теплопередающее устройство, работающее по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла и способное передавать большие количества тепла при минимальном температурном перепаде.

Тепловая труба в общем случае состоит из трех секций или зон: зона испарения (1), адиабатическая зона (2) и зона конденсации (3) (рис. 1).

Тепло подводится к зоне испарения (1), вследствие чего рабочая жидкость, находящаяся в равновесии с паром, испаряется. Под действием перепада давления между «горячей» зоной испарения и «холодной» зоной конденсации пар перетекает в зону конденсации (3) и здесь конденсируется. При фазовом переходе жидкость поглощает или, соответственно, выделяет скрытую теплоту испарения. По капиллярной структуре жидкость возвращается из зоны испарения в зону конденсации под действием капиллярных сил.

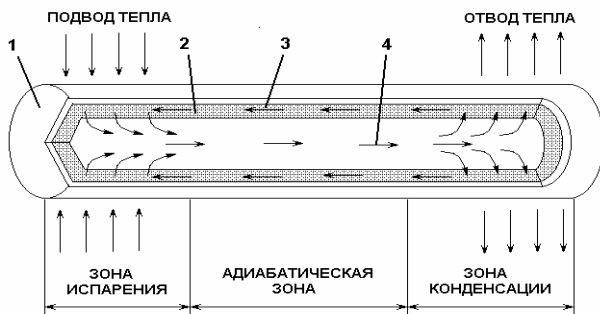


Рис. 1. Схема работы тепловой трубы: 1 – корпус ТТ, 2 – капиллярная структура, 3 – жидкий теплоноситель, 4 – пар

В настоящий момент нами прорабатывается вариант применения тепловых труб в системе охлаждения КС-ЭВМ. На рис. 2 представлен эскиз возможной системы охлаждения. Тепловые трубки отводят радиаторы в свободную зону корпуса, где происходит охлаждение воздушным потоком.

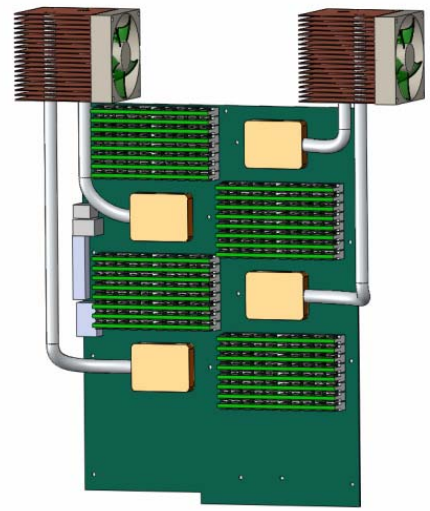


Рис. 2. Система охлаждения с применением тепловых труб

## Азотное охлаждение

Азотное охлаждение нашло применение в области экстремальных разгонов компьютеров. Системы охлаждения, в которых в качестве хладагента используется азот или гелий, позволяет получать отрицательные температуры на процессорах, тем самым дает возможность разгонять их до очень больших частот без риска перегрева. Применение их в системе охлаждения КС-ЭВМ невозможно по ряду причин, в частности из-за необходимости постоянного пополнения системы азотом, который в течение работы выкипает (невозможно сделать такую систему охлаждения компактной – емкость с хладагентом должна быть высокой). Так же емкость с жидким азотом должна находиться над процессором, следовательно, материнские платы должны располагаться горизонтально. На рис. 3 показана медная емкость с жидким азотом установленная непосредственно над процессором.



Рис. 3. Азотное охлаждение процессора

## Фреоновое охлаждение

Образование холода происходит вследствие циркуляции фреона по контуру. Из компрессора хладагент в газообразном состоянии попадает в конденсатор. Там он превращается в жидкость, после чего проходит через фильтр-осушитель в капилляр, который ведет к испарителю, который устанавливается на элемент требующий охлаждения. На этом пути, из-за низкого давления, фреон начинает кипеть при минусовой температуре и по обратной линии попадает в компрессор уже в газообразном состоянии. На рис. 4 показан цикл работы фреонного охлаждения.



Рис. 4. Фреоновое охлаждение

Система фреонного охлаждения на основе фазового перехода также широко применяется в области экстремального охлаждения разогнанных процессоров. Ее применение в охлаждении КС-ЭВМ не целесообразно: высокая стоимость, большой вес (более 18 кг), занимает много места.

## Система жидкостного охлаждения

Для решения поставленной задачи – сделать КС-ЭВМ малозумной, было принято решение использовать жидкостную систему охлаждения.

С ростом мощности вычислительных систем на рынке появилось большое количество систем жидкостного охлаждения. Существуют как готовые решения систем жидкостного охлаждения, так и набор комплектующих, из которых можно самостоятельно собрать собственную систему охлаждения. На рис. 5 показан цикл работы жидкостного охлаждения.

Помпа прокачивает воду, которая последовательно проходит все элементы цикла охлаждения по соединительным трубкам. Затем вода попадает в радиатор, где происходит охлаждение. Для улучшения охлаждения на радиатор устанавливается 120мм малозумный вентилятор. После радиатора вода попадает в расширительный бак и цикл повторяется. Система жидкостного охлаждения обладает низким уровнем шума так как использует малозумные вентиляторы для охлаждения радиатора и помпы для прокачки воды.

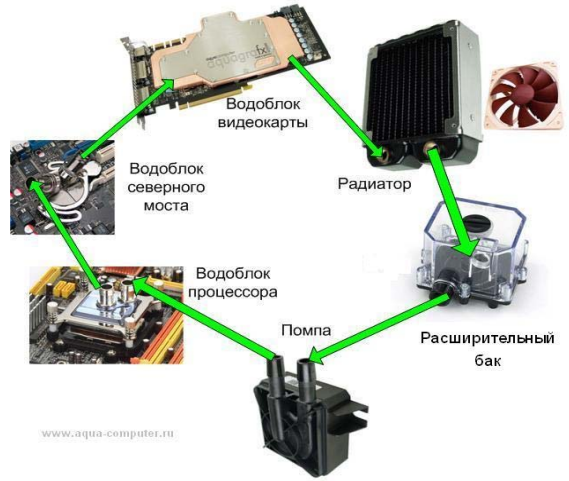


Рис. 5. Цикл работы жидкостного охлаждения

Для охлаждения КС-ЭВМ специалистами ВНИИЭФ была реализованная конструкция одноконтурной системы охлаждения, позволяющая обеспечить отвод тепла от 12 процессорных элементов. На рис. 6 представлен цикл жидкостного охлаждения КС-ЭВМ.

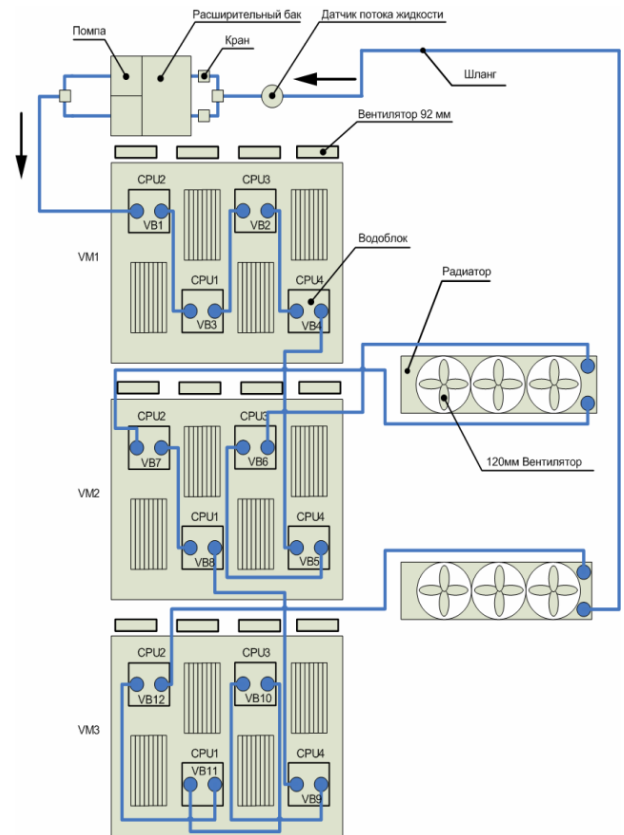


Рис. 6. Цикл жидкостного охлаждения КС-ЭВМ

Расширительный бак Acrylic Dual (рис. 7) от фирмы XSPC позволяет устанавливать две помпы Laing ddc непосредственно снизу резервуара. Для этого у помпы нужно снять крышку.





Рис. 7. Расширительный бак Acrylic Dual



Рис. 8. Помпа Laing ddc

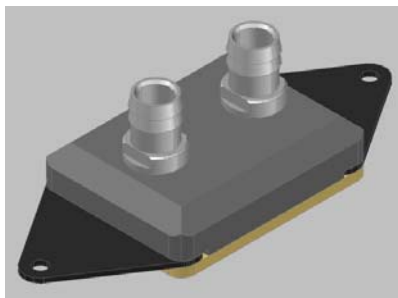


Рис. 9. Водоблоки Promodz g34



Рис. 10. Радиатор Black Ice 360

Помпа Laing ddc (рис. 8) разработана специально для использования в системах жидкостного охлаждения: малошумная (15 дБ), компактная, допустимый диапазон напряжения от 6 до 12 В, мощность 600 л/ч, наработка на отказ 50000 часов. В системе охлаждения КС-ЭВМ установлено две помпы. В случае поломки одной система мониторинга автоматически задействует запасную. В штатном режиме работы система мониторинга каждые пять часов переключает помпы для равномерного изнашивания.

Вода по соединительным трубкам поступает на водоблоки (рис. 9), которые устанавливаются на процессорах. Так как готовых водоблоков для сокетa g34 на момент разработки АПК-1 не было, фирма Promodz по нашему заказу изготовила собственные водоблоки.

Для охлаждения оперативной памяти и чипсета материнской платы установлены четыре 92 мм вентилятора, которые выдувают нагретый воздух из корпуса.

После прохождения первых шести водоблоков нагретая вода попадает в радиатор (рис. 10), где происходит охлаждение. Для улучшения охлаждения на радиаторы установлены малошумные 120 мм вентиляторы.

Затем вода проходит остальные шесть водоблоков и попадает на второй радиатор. Перед тем, как вода попадает обратно в резервуар и повторит цикл, она проходит через датчик потока воды (рис. 11). Если датчик не фиксирует движение жидкости (число оборотов = 0), то система мониторинга автоматически отключает систему.



Рис. 11. Датчик потока воды

## Испытание системы охлаждения КС-ЭВМ

Проверка работы системы жидкостного охлаждения проводилась при температуре окружающей среды 30 °С. Измерения температуры проводились с помощью системы мониторинга КС-ЭВМ.

При полностью включенной системе без нагрузки на процессоры температура находится в диапазоне 29–33 °С, температура чипсета – 36 °С (рис. 12).

Максимальная нагрузка КС-ЭВМ была достигнута при проведении теста Linpack, в ходе которого процессоры нагрелись до 55°С градусов, а чипсет – до 40°С (рис. 13). Данные тестирования показали, что система охлаждения работает исправно и способна эффективно охлаждать КС-ЭВМ.

## Улучшение системы охлаждения КС-ЭВМ

Для улучшения работы системы жидкостного охлаждения КС-ЭВМ и повышения надежности планируется заменить соединительные трубки на металлический каркас рис. 14. Для стабилизации давления внутри системы будет установлена мембрана.





Рис. 12. Температура КС-ЭВМ без нагрузки



Рис. 13. Температура КС-ЭВМ во время теста Linpack

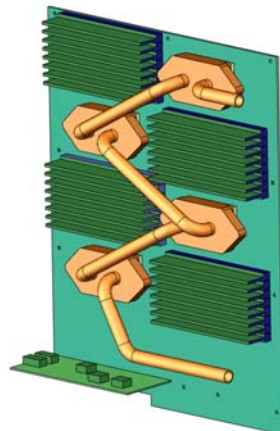


Рис. 14. Эскиз металлического каркаса

## СОДЕРЖАНИЕ

### Пленарные доклады

<i>Борисова Е. И., Занькова О. Н.</i> Проектирование модуля «Внутрицеховое планирование и диспетчирование» интегрированной автоматизированной системы управления цехом .....	4
<i>Здорова М. В., Копкин С. В., Ветчинников М. В., Давыдов И. А., Пронин Е. А.</i> Моделирование методом кластерной динамики высокоскоростного осколочного воздействия на многослойные преграды .....	8
<i>Канафеева Л. В., Штыров М. В., Тарасов А. А., Гончаров И. Д., Горелов А. М., Горячев Э. Ю., Морозова Е. В., Шаравин Э. А., Яновский В. Н., Санкин Е. В., Лазарчук В. П.</i> Исследование и реализация технологии изготовления оболочек зеркал рентгеновского телескопа ART-XC с применением высокотехнологического оборудования .....	17
<i>Осоченко Е. А., Ванин А. В.</i> Оптимизация метрологических параметров первичного преобразователя ускорения .....	24
<i>Старостина А. А., Амеличев П. А., Герман В. Н., Гребенникова С. Э., Вахмистров С. А.</i> Расчетно-экспериментальные модели развития самоподдерживающейся реакции взрывчатых веществ при различных температурных воздействиях .....	29

### Секция 1. Теоретическая и математическая физика

<i>Авдошина Е. В.</i> Схема решения уравнения теплопроводности с использованием температуры на грани ячейки в методике РАМЗЭС-КП .....	38
<i>Бочков Е. И.</i> Механизм инициирования молнии, основанный на развитии лавин релятивистских убегающих электронов .....	45
<i>Ветчинников М. В., Копкин С. В.</i> Моделирование поликристаллических веществ в комплексе МД .....	51
<i>Егоров П. В., Линник Д. М.</i> Методика Д. Об одном алгоритме расчета двумерных лагранжевых контактных границ .....	58
<i>Касаткин С. С., Гребенников А. Н., Мжачих С. В., Алексеев А. В., Крутько Н. А., Гусев Е. А., Бнятов А. В., Евдокимов В. В., Москвин А. Н., Пепеляев М. П.</i> Параллельная версия комплекса программ расчета характеристик ячеек реакторов CONCORD .....	64
<i>Каякин А. А., Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Куделькин В. Г.</i> Широкодиапазонное полуэмпирическое уравнение состояния вольфрама с эффективным учетом ионизации .....	72
<i>Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Симонов Г. П., Циберев К. В., Шувалова Е. В.</i> Результаты верификации моделей упругопластического деформирования и разрушения, реализованных в пакете программ ЛЭГАК-ДК .....	79
<i>Крючков И. А., Копкин С. В.</i> Программный комплекс моделирования методом молекулярной динамики для гибридных вычислительных систем .....	87
<i>Малькин А. Г., Рослов В. И., Залялов А. Н., Горбунов А. В., Донской Е. Н.</i> Методика С-007 для моделирования совместного переноса нейтронов, электронов, позитронов и гамма-квантов методом Монте-Карло .....	94
<i>Овчинников А. М., Козуб А. Г.</i> Глобальные перестройки пространственной сетки и пересчет сеточных величин в двумерных расчетах по методике КОРОНА .....	100
<i>Опасин Д. В.</i> Одномерная кинетика электронов и дырок в полупроводниках .....	107
<i>Половникова Т. Н., Воротинов А. А.</i> Опыт использования библиотек SCOTCH и MeTiS для декомпозиции неструктурированных сеток в методике ТИМ .....	114
<i>Рыбкин А. С., Залялов А. Н., Малькин А. Г., Огнев С. П., Рослов В. И.</i> Программный комплекс на базе гибридных вычислительных систем для расчета критических параметров методом Монте-Карло .....	120
<i>Сидоров М. Л.</i> Модификация алгоритма Боуэра – Уотсона генерации двумерных неструктурированных сеток в областях произвольной формы .....	126
<i>Абрамов А. В., Елсуков В. П., Минаев И. В., Симоненко В. А., Углов А. С., Филатов С. Ю.</i> Математическое моделирование падения астероида в океан и последующего наката волны на берег .....	135
<i>Хатунцев К. Е., Хмельницкий Д. В.</i> Программа ПРИЗМА-СВЕТ, расчет переноса светового излучения .....	145
<i>Цаплин Д. В.</i> Зарождение сверхпроводимости в гибридных структурах «сверхпроводник II рода – ферромагнетик» и «сверхпроводник I рода – ферромагнетик» .....	150
<i>Шумкина Е. Н., Бабанов А. В.</i> Решение двумерного уравнения теплопроводности в методике МИМОЗА с формированием общей системы линейных алгебраических уравнений по всей задаче .....	159

<i>Шурыгин А. В., Воропинов А. А., Шмелева А. К.</i> Построение сетки Дирихле на основе триангуляции Делоне для методики ТИМ-2D .....	167
<i>Близнюк Г. Г., Будникова С. С., Логинов И. А., Пажин Д. Г., Семенова С. Е., Шутова Н. А.</i> Система сбора и обработки информации о счете задач и работе неоднородного вычислительного комплекса «СТАТ-НВК» .....	175

## **Секция 2. Экспериментальная физика**

<i>Анциферов С. А., Калиновский В. В.</i> Применение интерферометра Фабри-Перо для селекции лазерных импульсов в условиях большой фоновой засветки .....	186
<i>Баркин В. В., Наумова С. В.</i> Влияние модулированного электромагнитного излучения нетепловой интенсивности на уровень спонтанной двигательной активности и вегетативный статус крупных лабораторных животных .....	191
<i>Вертей А. В., Малков И. Л., Юхимчук А. А.</i> Сравнение параметров водородопроницаемости нержавеющей стали 08X18H10T в области упругой и пластической деформаций .....	197
<i>Кротов В. А., Виноградов А. В., Поздняков Е. В.</i> Многоцелевой интерферометр для двумерной регистрации искажений волнового фронта прозрачными оптическими элементами .....	202
<i>Вялых Д. В., Дубинов А. Е., Львов И. Л., Садовой С. А., Корнилова И. Ю., Жданов В. С.</i> Генераторы мощных высокочастотных импульсов на основе отпаянных газоразрядных камер с полым катодом .....	210
<i>Георгиевская А. Б., Раевский В. А.</i> Оценка спектральных характеристик частиц, выбрасываемых со свободной поверхности металлов и жидкостей под действием ударной волны .....	213
<i>Голубев А. В., Синельникова И. А., Лобкаева Е. П.</i> Анализ изменений активности головного мозга биообъектов при воздействии электромагнитного поля нетепловой интенсивности .....	220
<i>Грушко В. В., Моисеенко А. Н., Филиппов А. В., Таценко О. М., Казаков С. А.</i> Измерение тока дискового взрывомагнитного генератора фрагментированным фарадеевским датчиком .....	226
<i>Давыдов И. И., Шакиров И. Р., Хохлов Н. С.</i> Применение современных методик для определения химстойкости взрывчатых веществ (ВВ) .....	230
<i>Еремин А. А., Лобачев Д. И., Львов Л. В., Чернов И. Е.</i> Исследование качества дисковых активных элементов установки «Луч» .....	232
<i>Жабыка Л. В., Учаев А. Я., Сельченкова Н. И.</i> О возможности построения расчетной иерархической модели процесса динамического разрушения металлов .....	237
<i>Климов А. Н., Шкапа А. Ф., Филиппов Д. В.</i> Влияние скоростной аберрации света на распространение зондирующего излучения при лазерной локации космических аппаратов .....	241
<i>Коршунов А. С., Кудасов Ю. Б., Маслов Д. А., Павлов В. Н.</i> Релаксация намагниченности фрустрированных спин-цепочечных систем: $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ .....	245
<i>Грунин А. В., Ткачук Д. В., Корочкина О. В., Кротова О. С.</i> Исследование новых дозиметрических пленок на основе ароматических аминов и тетрабромметана при воздействии тормозного излучения моделирующих установок .....	249
<i>Зубков А. А., Купырин Н. В., Хавронин Н. Н.</i> Высоковольтный импульсно-периодический генератор с лазерной синхронизацией для питания специального фотоэлемента СВЧ-генератора .....	254
<i>Вялых Д. В., Дубинов А. Е., Корнилова И. Ю., Львов И. Л., Садовой С. А.</i> Влияние длины катода на характеристики генерации ВЧ-генератора на основе разряда с полым катодом .....	260
<i>Мансуров Д. О., Моисеевских М. А., Пучагин С. Ю., Страбыкин К. В.</i> Экспериментальные исследования импульсного сильноточного ускорителя электронов «Гамма-1» с магнитоизолированной линией и диодом .....	264
<i>Маслов Д. А., Кудасов Ю. Б.</i> Корреляционный механизм отрицательного дифференциального сопротивления в молекулярной проволоке .....	269
<i>Воронич И. Н., Зималин Б. Г., Кедров А. И., Маслов Д. В., Мочкаев С. В., Романов В. В., Рукавишников Н. Н., Савкин А. В., Сухарев С. А., Триканова О. В.</i> Параметрические усилители чирпированных лазерных импульсов .....	271
<i>Мишагина М. Н., Лобкаева Е. П.</i> Влияние сложномодулированного магнитного поля на вегетативную нервную систему крыс при гипотермии .....	280
<i>Музюкин К. М., Крылевский Е. Н., Лазарев С. А.</i> Программный комплекс для измерительной системы на базе осциллографов Lecroy WavePro 715 ZI .....	284
<i>Мухин А. В., Лазаренко В. И., Синьков С. Н., Фролов Ю. Н.</i> Высокоэффективная акустооптическая амплитудная модуляция излучения твердотельного гольмиевого (Ho: YAG) лазера .....	290
<i>Наумова С. В., Кедров А. И., Голубев А. В.</i> Моделирование задающих сигналов и контроль параметра электромагнитного поля в рабочей зоне магнитогенератора .....	295
<i>Ошкин И. В., Троцюк К. В.</i> Исследование стартовых токов генерации в лампе обратной волны .....	302

<i>Панченко А. Н., Цыганков Б. В., Кудрявцев Ю. Г.</i> Электронная система для быстрого измерения температуры рабочего тела калориметра .....	306
<i>Пухов М. А., Пушков В. А., Юрлов А. В., Подурец А. М.</i> Исследование адиабатического локализованного сдвига в металлах методом составного стержня Гопкинсона .....	310
<i>Симутин А. С., Чернов М. Ю., Семенов Д. С., Орлов А. Д.</i> Характеристики детектора гамма-излучения на основе монокристалла LaBr <sub>3</sub> (Ce) и ФЭУ-184 .....	315
<i>Собур Д. А.</i> Амальгамная лампа для генерации вакуумного ультрафиолетового излучения (185 нм) .....	321
<i>Соколова А. С., Невмержицкий Н. В., Сеньковский Е. Д., Сотсков Е. А., Половников А. А., Левкина Е. А., Лобов Л. А.</i> Влияние числа Маха ударной волны на рост зоны турбулентного перемешивания на контактной границе газов .....	325
<i>Тарасов В. В.</i> Рождение резонансных состояний, содержащих странные кварки, в $\Sigma$ А-взаимодействиях ...	334
<i>Турутин В. В., Мартынов В. М., Козачёк А. В., Спириин Д. П.</i> Высоковольтный стенд для испытаний генераторов импульсных напряжений .....	340
<i>Фарафонов Д. С., Губин Д. С.</i> Моделирование ускорительной трубки для импульсного сильноточного ускорителя электронов «ГАММА-1» .....	344
<i>Фарафонов Д. С., Миронычев Б. П.</i> Экспериментальное определение индукции насыщения сердечников из аморфного ферромагнитного сплава 2НСР .....	348
<i>Филатов И. В., Бакумов А. О., Воеводин С. В., Долотов А. С., Иванов М. М., Федосеев И. Г., Чернышов В. А., Шарabanов П. А., Шибитов Ю. М.</i> Исследование источника ионизации на основе несамостоятельного разряда низкого давления .....	353
<i>Халдеев Е. В., Андреевских Л. А., Жбанова Н. Н., Пахомов А. В., Шейков Ю. В.</i> Автоматизированный комплекс для исследований свойств взрывчатых веществ при тепловых воздействиях .....	357
<i>Ханин Д. В., Сырунин М. А., Мельяс В. Ю., Портнягина Г. Ф.</i> Исследование параметров фрагментации тонких сферических оболочек с помощью импульсной протонной радиографии .....	361
<i>Цибиков З. С., Аблесимов В. Е., Базанов А. А., Карпов Г. В., Краев А. И., Шахалкин А. Т.</i> Подготовка плазмфокусной разрядной камеры к взрывному эксперименту .....	367
<i>Цыганков Б. В., Хвостов В. В.</i> Разработка централизованной системы синхронного запуска осциллографов .....	371
<i>Юрлов А. В., Пушков В. А., Абакумов А. И., Кальманов А. В., Седов А. А., Родионов А. В.</i> Реакция взрывчатого вещества на основе октогена на низкоскоростное нагружение стальным цилиндрическим ударником .....	374

### **Секция 3. Инженерные науки**

<i>Акимов Д. В., Осоченко Е. А.</i> Разработка методики и результаты исследования нелинейных режимов работы силочувствительных пьезоэлектрических резонаторов .....	378
<i>Бобрнев К. А.</i> Разработка методики контроля параметров, определяющих механические свойства материала оболочек, подвергнутых сложнапряженному состоянию .....	383
<i>Бураков И. М., Плаксеев А. А., Григорьев М. М., Подпорина Н. А.</i> Моделирование работы системы пассивного отвода тепла в условиях ветровых нагрузок .....	388
<i>Ганьшин Н. В., Григорьев М. М., Журавлева О. Ю., Плаксеев А. А., Подпорина Н. А.</i> Оценка возможности использования спринклерной системы для охлаждения бассейна выдержки 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС в режиме полной выгрузки ядерного топлива из реактора .....	393
<i>Гордеев И. Н., Липатников М. А., Мухаметшин Р. С., Степанов А. С., Пермьяков К. Н.</i> Разработка многоразового взрывозащитного контейнера для лазерно-интерферометрических измерений .....	396
<i>Давыдов Е. Ю., Кавитов П. Н., Шалин В. М., Мудрилов А. И., Любимцев Д. А.</i> Установка и методика снижения концентрации примесей олова в диэтилцинке, обедненном по изотопу <sup>64</sup> Zn, до соответствия его международным стандартам качества .....	400
<i>Друмев И. В., Елин С. В.</i> Экспериментальные исследования системы электромагнитного подвеса модели ротора турбомшины атомной станции с высокотемпературным реактором .....	404
<i>Евграшин П. Ю., Белов М. А.</i> Особенности современного представления об образовании погрешности установки заготовок на операциях механической обработки .....	410
<i>Егорова М. А., Ефимов С. Д., Панков А. Н.</i> Разработка конструкции магнитной системы магниторезистивного датчика углового положения .....	414
<i>Ереев М. Н., Марков А. С., Панов В. А.</i> Моделирование накопления усталостных повреждений в материале оборудования реакторной установки .....	420
<i>Митясов С. Г., Есавкин К. В.</i> Современные технологии при проектировании и изготовлении приборов точной механики .....	425

<i>Кириленко Е. В., Безрученков М. В.</i> Использование метода дифференциальной сканирующей калориметрии для контроля качества технологических процессов в производстве полупроводниковых приборов .....	429
<i>Клешнёва М. А.</i> Нормативное обеспечение технологичности конструкции изделий .....	435
<i>Колесников С. В., Собянин В. Г., Клопов А. А.</i> Разработка магнитной схемы двухканального поляризованного электропривода .....	441
<i>Кондуков В. П., Патрушев В. Л., Соловьев С. А.</i> Использование современных компьютерных технологий при обосновании работоспособности исполнительных механизмов системы управления и защиты реакторной установки атомной электростанции .....	446
<i>Котик А. И., Гаврилов Г. Г.</i> Моделирование электронных устройств с учетом механических воздействий .....	452
<i>Крылов И. М.</i> Исследование возможности и условий определения механических свойств материала полусферических оболочек при их гидростатическом нагружении .....	456
<i>Любимцев Д. А., Мудрилов А. И., Шалин В. М., Кавитов П. Н., Давыдов Е. Ю.</i> Нормализация изотопного состава диоксида углерода по кислороду в воде .....	461
<i>Ляцко А. В., Кустова Г. П., Сажнов В. В., Тесаловский Н. А.</i> Применение метода газовой хроматографии с гелиевым ионизационным детектором в исследовании карбидизации уран-графитового топлива импульсного ядерного реактора БИГР .....	465
<i>Мезенцев П. П., Доровских Б. В., Люльчак В. В., Мальшев В. В., Солдатов Я. Б., Мартюков П. С.</i> Внедрение режима импульсной разгрузки турбогенератора на энергоблоке № 2 Ростовской атомной станции .....	470
<i>Морозова Т. А., Афанасьев В. А., Бадыгеев А. А., Беловодский Л. Ф., Кужель М. П., Сухаренко В. И., Тагиров Р. М., Царёва С. М.</i> Способ снижения пожаровзрывоопасности газовых сред, образующихся в результате термодеструкции органических теплоизоляционных материалов .....	475
<i>Назарова М. В.</i> Расчет эффективности замены ламп накаливания на энергосберегающие лампы .....	480
<i>Петкевич И. Г., Алёхин Г. В.</i> Разработка и верификация нодализационной схемы реактора ВВЭР-1000 в программном комплексе КОРСАР/ГП на основе международных тестовых задач .....	483
<i>Платонов В. А., Баранов Р. В.</i> Методика инженерного анализа конструкций электронных приборов на воздействие механических факторов .....	491
<i>Пресняков Д. В., Щедрина Е. В., Попов Н. Н., Ларькин В. Ф., Аушев А. А., Сысоева Т. И., Веселов В. Н., Суворова Е. Б., Костылева А. А.</i> Исследование свойств перспективного сплава с памятью формы системы Ti-Ni-Nb с широким мартенситным гистерезисом в литом и прессованном состоянии .....	495
<i>Рыбкин Е. А.</i> Магнитно-импульсное упрочнение резцов .....	503
<i>Рябцов А. В., Исхаков С. А., Замятин В. А., Кайдалов В. Б.</i> Верификация блоков учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести для анализа напряженно-деформированного состояния и радиационного формоизменения одиночной тепловыделяющей сборки реакторов типа БН с использованием программного комплекса «ANSYS» .....	507
<i>Сазонов А. А., Яшианин И. Б.</i> Разработка базовых технологических маршрутов изготовления изделий микросистемной техники .....	512
<i>Аушев А. А., Дрожжин В. С., Куваев М. Д., Куликов С. А., Пикулин И. В., Попов Н. Н., Пухова В. И., Романова О. Н., Самсонов Г. Ю., Ховрин А. Н.</i> Получение нанодисперсных порошков вольфрама с применением методов механоактивации .....	517
<i>Смагин А. В., Шумейкин Р. П.</i> Об особенностях расчета собственных частот и форм колебаний конструкции методом конечных элементов .....	523
<i>Тарабанов А. Н.</i> Разработка конструкции транспортного туннеля к технологическому комплексу для изготовления и хранения брикетов .....	529
<i>Тихонов В. В., Шестаков П. В., Денисов Е. А.</i> Работоспособность защитных покрытий на основе хрома на циркониевом сплаве в паровой среде .....	535
<i>Чуркин К. Г.</i> Проблемы конструирования и проектирования МЭМС устройств .....	540
<i>Шахурина И. С., Голубков А. Н., Фильчагин С. В., Юхимчук А. А., Kumar S., Siskind B.</i> Исследование характеристик интерметаллида $(Ti_{0,9}Zr_{0,1})_{1,1}CrMn$ в процессе термоциклирования .....	543
<i>Шильников А. А., Аладышева Н. Н.</i> Анизотропное плазмохимическое травление монокристаллического кварца на глубину более 250 мкм .....	546

#### **Секция 4. Информационные системы и технологии**

<i>Балковая Г. И., Буренкова Е. В., Смирнов М. К.</i> Разработка информационно-справочной системы для оценки радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры .....	552
---	-----

<i>Баранов В. Н., Рябов В. А.</i> Уменьшение времени переключения транзисторной оптопары 30Т110Б .....	556
<i>Васькин А. В., Ведерников В. Л.</i> Верификация и валидация расчетного пакета и разработка регламента работ по определению некоторых критериев надежности конструкции .....	559
<i>Городнов А. А., Елисеев И. А., Жуков И. В., Мочалов М. Р., Сорокин С. В., Мурин В. Н.</i> Интеллектуальная видеосистема контроля и регистрации проезда автотранспорта .....	561
<i>Даниленко А. С., Марунина М. А., Гунин В. И.</i> Опыт применения сервис-ориентированных архитектур в разработке программного обеспечения .....	567
<i>Дикарев К. И., Фотин С. В., Перетрухин С. Ф.</i> Опыт моделирования работы аппаратов воздушного охлаждения на компрессорных станциях в рамках разработки программного обеспечения «Нагнетатель» для оптимизации стационарных режимов транспортирования природного газа .....	571
<i>Дмитриев Н. А., Лашманов В. Н., Стрюков В. Н., Шатохин А. В., Шмаков Е. Л., Черных С. О.</i> Сервисная подсистема универсальной компактной супер-ЭВМ .....	578
<i>Елисеев И. А., Городнов А. А., Жуков И. В., Николаев Д. П., Эльяш С. Л., Юрьев А. Л.</i> Применение интеллектуального видеодатчика для измерения распределения дозы в пятне тормозного излучения ускорителей АРСА .....	587
<i>Богодяж И. В., Гришин А. В., Застылов А. А., Костин С. А.</i> Программные средства обработки радиотелеметрической информации при проведении испытаний на многоцелевом испытательном комплексе (МИК) РФЯЦ-ВНИИЭФ .....	592
<i>Климов К. В.</i> Комплексное моделирование на примере разработки пульта питания рентгеновского аппарата .....	597
<i>Кузнецова Э. Ю., Немченко И. А., Мулин И. И., Анисимов Ю. А.</i> Обеспечение аутентичности технических систем при использовании распределенных алгоритмов управления .....	601
<i>Латылов Т. И., Ведерников В. Л., Масыгин А. М., Пиголкин А. В., Хлестков С. М.</i> Программно-аппаратный комплекс для моделирования работы приборов и устройств .....	603
<i>Маркелова А. В., Тышкевич М. Ю.</i> Коммерциализация научно-технических разработок научно-испытательного отделения .....	609
<i>Моксяков А. Н., Погодин Е. П.</i> Анализ стойкости криптографических алгоритмов в GSM сетях .....	611
<i>Надежкина И. А., Дарымов В. К.</i> Автоматизация процессов поверки. Создание программно-аппаратного комплекса по поверке универсальных цифровых вольтметров в полуавтоматизированном режиме с применением калибратора Fluke 9100 .....	613
<i>Немченко И. А., Николаев Д. Б., Медведев В. Б.</i> Исследование возможности применения современных алгоритмов управления объектами для повышения надежности функционирования технических систем ...	618
<i>Одинцов М. В., Мартынов А. П.</i> Анализ базовых преобразований структурных компонентов криптографических алгоритмов .....	622
<i>Плешакова Н. В., Анохин А. Н.</i> Разработка метода формализованного представления аварийных процедур для операторов блочных пунктов управления АС .....	626
<i>Серикова С. В., Трищенко А. В., Ведерников В. Л.</i> Особенности формирования и внедрения IT-решений в сквозные процессы разработки высокотехнологичной продукции .....	631
<i>Скрябин С. А., Трищенко А. В.</i> Проблема оценивания в системном анализе .....	636
<i>Снигерев В. В., Калимуллин А. Г.</i> Основные решения по созданию систем радиационного контроля на базе технических средств из состава АСРК-2000 <sup>TM</sup> .....	640
<i>Тарасюк Е. В., Савицкий А. В.</i> Автоматизированная система контроля технологических параметров и тепловой эффективности (АСКТП и ТЭ) .....	645
<i>Доровских Б. В., Люльчак В. В., Малышев В. В., Уваров Д. С., Феоктистова Е. В.</i> Концепция проектирования, испытания и ввода в эксплуатацию автоматизированной системы управления технологическим процессом атомной электростанции .....	652
<i>Шлыков С. Н., Дмитриев Н. А., Игрунов В. И., Лашманов В. Н., Стрюков В. Н., Шатохин А. В.</i> Система жидкостного охлаждения универсальной компактной супер-ЭВМ .....	659

## **Молодежь в науке**

Сборник докладов  
девятой научно-технической конференции  
(26–28 октября 2010 г.)

Компьютерная подготовка оригинала-макета: *Фролова С. Н., Макеева С. В., Солук Н. Ю.,  
Моисеева Е. В., Соседко Е. Л., Мишкина Н. В.*

Корректор: *Степченкова Л. В.*

Печатается с оригинальных текстов авторов

---

Подписано в печать 16.09.2011 Формат 60×84/8  
Печать офсетная Усл. печ. л. 80,6 Уч.-изд. л. 73  
Тираж 150 экз. Зак. тип. 626-2011

---

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл.