РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

РФЯЦ ВНИИЭС

МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ СБОРНИК ДОКЛАДОВ XVII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»



МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ

Сборник докладов

17-й научно-технической конференции 30 октября – 01 ноября 2018 г.

г. Саров 2019 Авторы-составители: Н. Н. Попова, Е. М. Порошин, Д. А. Рудаков, А. Э. Размыслова

Главный научный редактор: д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев Редакционный совет: д-р физ.-мат. наук А. Е. Дубинов; д-р техн. наук А. П. Мартынов; д-р физ.- мат. наук В. С. Нефедов; д-р физ.- мат. наук В. А. Раевский; канд. физ.- мат. наук О. Г. Алексеев; канд. физ.- мат. наук С. А. Буйко; канд. физ.- мат. наук С. В. Воронцов; канд. физ.-мат. наук А. Н. Гребенников

«Молодежь в науке». Сборник докладов 17-й научно-технической конференции. – Саров: М-75 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 546 с., ил.

ISBN 978-5-9515-0439-5

Научно-техническая конференция «Молодежь в науке» проводится ежегодно на протяжении 16 лет.

Она стала привлекательной площадкой для общения молодежи и поддержания научных связей между молодыми специалистами предприятий атомной отрасли.

Традиционным стало участие в конференции молодых специалистов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», ФГУП «ПСЗ», ОАО «ОКБМ Африкантов».

По рекомендации редакционного совета в сборник вошли 105 докладов молодых ученых и специалистов, представленные на секциях «Теоретическая и математическая физика», «Экспериментальная физика», «Инженерные науки», «Информационные системы и технологии»: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», ФГУП «ПСЗ», ОАО «ОКБМ Африкантов», ИПФ РАН, ННГУ им. Н. И. Лобачевского, НИИМ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Пленарные доклады

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Д. А. Мяндин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В настоящее время при проектировании систем автоматики одним из необходимых и наиболее часто используемых элементов является тороидальный трансформатор.

В ходе проектирования конструкторской документации отдельных узлов систем автоматики, возникает задача точного определения габаритов моточных изделий, так как слишком завышенные габаритные размеры приводят к образованию свободного, неиспользуемого пространства внутри блока, а заниженные значения являются технологическим препятствием и могут оказаться нереализуемыми на производстве. Таким образом, при проектировании трансформаторов необходимо как можно точнее обозначить допустимые максимальные габариты, обеспечив при этом как собираемость устройства, так и возможность намотки самого трансформатора.

Актуальность работы заключается в необходимости определения такой информационной системы, которая в результате взаимодействия с пользователем позволит определить желаемую структуру проектируемого трансформатора, его параметры и обеспечит быстрое создание конструкторской документации; а также в разработке новых методов расчета параметров обмотки, учитывающих современные требования к изготавливаемой продукции.

Анализ современного состояния проблемы

Электрический трансформатор – электромеханическое устройство, преобразующее при неизменной частоте переменный ток одного напряжения в другое за счет эффекта электромагнитной индукции. С конструктивной точки зрения тороидальный трансформатор представляет собой магнитопровод (сердечник), изготовленный из материала с высокой магнитной проницаемостью и выполненный в виде тора, на который намотаны две или более изолированные друг от друга обмотки.

Несмотря на свою кажущуюся простоту, тороидальный трансформатор – довольно сложная для математического описания электродинамическая система, о чем свидетельствует тот факт, что за последние полтора века (трансформатор был изобретен в 1876 году) отсутствуют какие либо адекватные математические модели, которые позволяли бы автоматизировать процесс расчета и проектирования этого изделия [1].

Кроме того, несмотря на многообразие современных систем автоматизированного проектирования, ни одна из них не позволяет полностью автоматизировать проектирование тороидального трансформатора, начиная от ввода исходных данных и заканчивая оформлением конструкторской документации.

Существующий процесс проектирования основывается на экспериментальных результатах. Задаваемые габариты трансформатора, длина обмоточного провода, коэффициент заполнения окна и другие параметры в конструкторской документации определяются фактическими размерами намотанного образца, а проведение механических итерационных расчетов вручную занимают много времени и неспособны быстро адаптироваться к изменяемым входным параметрам. Отдельного внимания заслуживают процессы создания технических требований для чертежей и другой сопутствующей информации (таблицы обмоточных данных, схемы обмоток, рисунки заделки выводов и проч.).

В связи с этим возникла необходимость сформировать облик системы поддержки принятия конструкторских решений при автоматизированном проектировании тороидальных трансформаторов, которая будет оперативно отслеживать любые изменения, введенные пользователем, производить необходимые вычисления и совершать за него всю многообразную повторяющуюся работу.

Конструктивные особенности тороидальных трансформаторов

Конструкция рассматриваемых трансформаторов представляет собой тороидальный магнитопровод, на который намотаны две или более изолированные обмотки, которые, в свою очередь, электрически и механически соединены с выводными проводами. Зачастую трансформаторы систем автоматики пропитываются различными компаундами и покрываются лаками, для обеспечения электрической и/или механической прочности. В связи с этим, основными конструктивными параметрами сердечников являются:

- внешний диаметр кольца сердечника;

– внутренний диаметр кольца сердечника;

- высота сердечника;

- радиусы скругления или фаски;

- наличие изоляции;

шероховатость обрабатываемых поверхностей;
 площадь окна.

После подготовки сердечника к намотке, его необходимо изолировать. Для этого используются бумага или пленка. Число слоев изоляции и толщина и ширина изолирующего материала выбираются исходя из геометрических параметров сердечника и рабочих напряжениях в обмотках.

Обмоточные провода производятся из разных материалов – они могут быть медными или алюминиевыми. В зависимости от типов используемых обмоточных проводов и выводных проводов, для обеспечения электрического и механического соединения применяется пайка или сварка. В случае соединения медных обмоточных проводов и алюминиевых выводных проводов, применяют биметаллические пластины.

Существуют разные виды намотки тороидальных трансформаторов:

 по технологическому признаку они подразделяются на намотку в навал, виток к витку по наружному диаметру и виток к витку по внутреннему диаметру;

 по схемотехническому признаку обмотки с общей точкой мотают, как правило, двойным проводом, в то время как простые обмотки – одинарным;

 по заполнению окружности трансформатора, обмотки могут располагаться равномерно по наружному диаметру или в определенных секторах;

– по уровням напряжений обмотки могут быть изолированы друг от друга, а в случае большого напряжения многовитковые обмотки мотают слоями, прокладывая изоляцию после каждого уровня обмотки.

Для обеспечения дополнительных высоких механических и электроизоляционных свойств трансформатора, используют пропиточные эпоксидные компаунды «горячего» отверждения.

Трансформаторы с межслоевой изоляцией для получения высоких электроизоляционных свойств и высокого коэффициента демпфирования используют полиуретановый компаунд.

Для последующей заливки пеной трансформаторы покрывают лаком.

Выводные провода, подобно обмоточным, также могут быть медными и алюминиевыми. Для придания выводным проводам большей гибкости их пропитывают церезино-масляным компаундом.

Требования, предъявляемые к конструкторской документации на трансформатор

Конструкторская документация – совокупность документов, содержащих данные, необходимые для

проектирования, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации и утилизации изделия [2].

Разработанный комплект конструкторской документации на трансформатор должен полностью соответствовать требованиям ЕСКД и других нормативных документов. Так как в трансформаторах используются обмотки, необходимо учитывать требования, представленные в [3].

Как правило, комплект конструкторской документации на трансформатор состоит из спецификации, чертежа детали сердечника и сборочного чертежа трансформатора.

Правила составления таблицы обмоточных данных и изображения схемы обмотки приведены в [3]. Указания о количестве слоев и витков обмотки, изоляции и бандажа, а также данные об их расположении помещают в технических требованиях или в таблице обмоточных данных, причем порядок расположения данных в таблице должен соответствовать порядку намотки, начиная от каркаса катушки.

Схема обмотки содержит условное изображение сердечника, и все обмотки, с указанием их начала. Количество изображенных на чертеже витков условно; оно может не соответствовать их числу, а также не зависит от числа слоев обмотки и толщины провода.

Выводы и промежуточные отводы обмоток должны иметь одинаковые обозначения с соответствующими выводами и отводами на схеме обмотки.

В технических требованиях указывают данные о намотке, изоляции, пропитке, пайке, сварке, лакокрасочном покрытии, заделке выводов, а также общие требования, допущения и недопущения.

Методы расчета геометрических параметров тороидального трансформатора

В соответствии с разными технологиями намотки существуют разные методы расчета параметров, основными методами являются: интегральный, итерационный и комбинированный метод.

Суть интегрального метода представлена на рис. 1, когда параметры обмотки пересчитываются исходя из коэффициента заполнения.

Итерационный метод показан на рис. 2. Он заключается в последовательном учете каждого витка, наматываемого на сердечник. Как и интегральный, итерационный метод может быть применен как к внутреннему, так и к наружному диаметру магнитопровода. В отличие от интегрального метода, где основой является оптимальное расположение витков в пространстве обмотки, в итерационном методе предполагается слоевая намотка, что особенно полезно при учете межслоевой изоляции.



Рис. 1. Интегральный метод



Рис. 2. Итерационный метод



Рис. 3. Распределение витков по слоям



Рис. 4. Усреднение плотности витков на каждом слое: а – до усреднения, б – после усреднения

При проектировании тороидальных трансформаторов зачастую возникает необходимость рассчитывать многослойные обмотки с межслоевой изоляцией. Как правило, такие обмотки представляют сомноговитковые катушки, работающие бой на относительно высоком напряжении. Для обеспечения электропрочности, эти обмотки мотают в один слой виток к витку по внутреннему диаметру с зазором между началом и концом намотки, а затем изолируют одним или более слоями изоляционного материала. Сложность заключается в том, чтобы обеспечить равномерно убывающее число витков от слоя к слою. Рассмотрим в качестве примера трансформатор, выполненный на сердечнике К12×8×6 и содержащий 1000 витков из провода с максимальным диаметром 0,104, к которому предъявляется требование в наличии зазора в 1 мм между началом и концом слоев обмотки.

Используя итерационный метод можно определить, что на первом витке могут разместится 238 витков, так как необходимо обеспечить зазор в 1 мм на первом слое максимум может уместится 228 витков, на втором – 221, на третьем – 214, на четвертом – 207, на пятом – 130.

Пояснение к расчету слоевой изоляции представлено на рис. 3 и рис. 4.

Из графика (рис. 4а) отчетливо видно, что количество витков всех слоев, кроме последнего, распределено равномерно и одинаково. Оставшееся количество витков на последнем слое распределено слишком свободно.

Следовательно, необходимо компенсировать плотную загрузку первых четырех слоев за счет последнего таким образом, чтобы распределение витков по всем слоям было равномерным. Это может быть достигнуто за счет последовательного перебрасывания по одному витку с каждого слоя кроме последнего, рис. 4б. В данном случае, при подобном распределении коэффициент плотности всей обмотки составляет 0,7223; коэффициент плотности первых четырех слоев – 0,7747; коэффициент плотности пятого слоя – 0,4971.

Реализация информационной системы поддержки принятия конструкторских решений автоматизированного проектирования трансформаторов

Система поддержки конструкторских решений должна реализовывать следующие функции:

 ввод входных параметров на основе исходных данных и информации, содержащейся в базе материалов и стандартных изделий (типоразмеры сердечников, параметры изоляционных материалов, параметры обмоточных проводов и их свойства);

 обработка введенных данных и вывод соответствующих исключений. Например, оповещение о недопустимом значении, повторной изоляции уже изолированного сердечника, недопустимости размещения указанного числа витков в окне сердечника и проч.;

 – реализация методов расчета параметров тороидального трансформатора на основе введенных данных;

– формирование шаблонов переменных эскизов в формате *.dwg. Под переменными эскизами в данном случае понимается изменяемая графика в конструкторской документации. Например: схема обмотки, таблица обмоточных данных, чертеж детали сердечника. Сборочный чертеж трансформатора получается из габаритной 3d-модели;

 – генерирование списка технических требований на основании введенных данных и рассчитанных параметров с возможностью редактирования этого списка;

 – создание подробного отчета о всех принятых в ходе проектирования решениях.

🖳 Transformer v.0.1	
O BE 🛛	🎚 📕 👿 TT 🕕
Обозначение:	Сердечник определен
	Обмотка определена.
	Обмоточные провода и 🛃
	💽 Провода выводов определены.
	Гобариты определены.
Отчет Закрыть все окна	Параметры заливки определены.

Рис. 5. Главное окно информационной системы

🖳 1. Сердечник 💷 🔤 💌	
Технические условия на сердечник:	CoreRequirement
ФДГК.757128.003 ТУ 👻	1 Размеры для справок
ФДГК.757128.003 ТУ Типоразмер сердечника: К12х8х6 ♥ Скруглить кромки? 0,2 © Составной? ♥ Изолировать? Пленка ПЭТ-Р Выбранно ФДГК1 2 К12х8х6 Внешний диаметр: 12 мм. Внутренний диаметр: 8 мм. Высота: 6 мм. Сердечник не изолированный Радиус скругления: 0,2мм.	 Размеры для справок. Размеры обеспечить инструментом. Допускается вместо радиуса R0,2 выполнять фаску 0,2x45°. На поверхностях, подвергающихся механической обработке, допускаются сколы, согласно контрольному образцу. После доработки термообработать при температуре (150±10)°C в течение 48 ч. Скорость нагрева и охлаждения не более 50°C в ч. Шероховатость обрабатываемых поверхностей √Rz20. Остальные TT по
Толщина изоляции 0,002мм.	
Количество слоев изоляции 2	Размер для справок размер единственный?
p i d p	Размер обеспеч. инстр. размер единственный?
	Допустить фаску вместо скругления
	Допустить сколы
	✓ Термообработать при Т = 150 °С, t = 48 ч.
	✓ Скорость нагрева и охлаждения 50 °С в ч.
	✓ Шероховатость √ Rz20 -
ТТ ОК	Остальные ТТ
AutoCAD Закрыть	ОК Отмена

Рис. 6. Определение параметров магнитопровода

Рис. 7. Список технических требований

На рис. 5 показано главное окно программы, в котором был осуществлен весь процесс проектирования.

Окно определения параметров магнитопровода показано на рис. 6. В нем разработчик выбирает из списка технические условия и типоразмер сердечника, указывает радиус скругления кромок, материал и число слоев изоляции (при необходимости). Так же имеется возможность определить список технических требований (рис. 7) и автоматически начертить эскиз для чертежа детали.

После того как все параметры указаны верно, при нажатии кнопки «ОК» на главном окне про-

граммы появится уведомление о том, что параметры сердечника успешно определены (для более подробного отчета можно развернуть раскрывающийся список).

В программе предусмотрена автоматическая проверка величины радиуса скругления. В случае если радиусы превысят половину высоты сердечника, выдается соответствующее предупреждение, приостанавливающее выполнение программы до тех пор, пока неисправность не будет устранена. Также при изоляции уже изолированного сердечника разработчик будет уведомлен о намерении своих действий, но тем не менее сможет продолжить работу.

星 2. Схема трансформатора	
Ответвление Левая обмотка Ответвление У с общей точкой У показать выводы	Ответвление Правая обмотка Ответвление
Укажите число витков: 🗹 показать обмотки	Таблица AutoCAD Удалить
300 💌 Гоказать витки Регенерировать	Схема AutoCAD Очистить
15 Вывод 13 1	Вывод 1
Обмотка 4 50 З Б	1660 Обмотка 1
	Вывод 2
Вывод 15	Вывод 3
Вывод 16	Вывод 4
Вывод 17	Вывод 5
Вывод 18	330 Обмотка 2
Обмотка 5 Вывод 19	Вывод 6
Обмотка 1, правая простая, содержит 1660 витков и два вывода: (вывод 1, вывод 2) нижний подборный вывод, содержит 20 витков и один вывод: (вывод 3) нижний подборный вывод, содержит 20 витков и один вывод: (вывод 4) Обмотка 2, правая простая, содержит 330 витков и два вывода: (вывод 5, вывод 6) нижний подборный вывод, содержит 10 витков и один вывод: (вывод 7) нижний подборный вывод, содержит 10 витков и один вывод: (вывод 8) Обмотка 3, правая	E
простая, содержит 350 витков и два вывода: (вывод 9, вывод 10) нижний подборный вывод, содержит 12 витков и один вывод: (вывод 11) нижний подборный вывод, содержит 12 витков и один вывод: (вывод 12)	
Отчет	ОК Закрыть
Сумма витков: 3141	

Рис. 8. Конструктор схемы обмоток трансформатора

В случае если выбрана функция «Составной» – кромки скругляются только с одной стороны, что отражается в эскизе заготовки.

При составлении списка технических требований можно выбрать необходимые пункты из перечня наиболее часто используемых требований. Пункты технических требований при этом нумеруются автоматически. Не исключена возможность ручной корректировки.

После определения сердечника идет этап определения схемы обмотки трансформатора. В данном случае программа предлагает построить схему из набора разных типов обмоток: простых (правых и левых), с общей точкой (правых и левых), верхних и нижних подборных выводов, с указанием количества витков. При этом программа автоматически производит нумерацию обмоток и выводов и составляет текстовый перечень сконструированной обмотки и подсчитывает общее число витков трансформатора. Пример составленной схемы обмотки представлен на рис. 8.

Также реализована возможность удалить последний созданный элемент или очистить область построения.

После составления схемы обмоток трансформатора автоматически генерируются объекты, содержащие в себе информацию об обмоточных проводах, изоляционном материале и проводе выводов. Выбор осуществляется из представленных списков и сохраняется в памяти системы.

Определив параметры сердечника, структуру и количество обмоток, изоляцию между обмотками, параметры обмоточного и выводного проводов, система обладает всеми параметрами для расчета геометрических характеристик по методикам, приведенным в предыдущем разделе. Определив параметры намотанного трансформатора, начинается процесс выбора и расчета заливки и пропитки.

Завершающим этапом автоматизированного проектирования конструкции трансформатора является создание списка технических требований. Для этого разработчику нужно выбрать те пункты, которые на его взгляд необходимо включить в этот список. Все пункты делятся на шесть категорий: параметры магнитопровода, параметры обмоток и выводов, параметры пайки, параметры пропитки и заливки, общие параметры и допущения.

Заключение

В настоящей работе были рассмотрены основные конструктивные особенности проектирования, тороидальных трансформаторов и требования, предъявляемые к конструкторской документации, приведены новые методы расчета конструктивных параметров и реализована информационная система автоматизированного проектирования, обладающая пользовательским интерфейсом, и позволяющая значительно сократить сроки разработки конструкции рассматриваемого класса изделий за счет автоматизации как вычислительных процессов, так и непосредственного создания эскизов и прочих графических объектов, являющихся неотъемлемой частью комплекта конструкторской документации.

В заключение стоит отметить, что проектирование тороидальных трансформаторов не ограничивается приведенными методами, однако созданная информационная система позволяет расширять и дополнять свой инструментарий новыми способами расчета и другими техническими требованиями, которые по тем или иным причинам не учтены в данной исходной версии программы.

Литература

1. Котенёв С. В., Евсеев А. Н. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2011.-287 с.: ил.

2. ГОСТ 2.001-2013 ЕСКД. Общие положения.

3. ГОСТ 2.415-68 ЕСКД. Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ БЕРИЛЛИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК, С ЗАДАННЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ

<u>И. В. Тузов,</u> И. А. Чугров, Н. Н. Мариничева, Н. Н. Краева, А. С. Вихорев, А. В. Илюшечкина

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

Введение

В рамках исследования ЛТС на установках с энергией мегаджоульного уровня применяются мишени, состоящие из сферической оболочки, наполненной дейтерий-тритиевой смесью. Одним из наиболее подходящих материалов для оболочки выступает бериллий, так как имеет ряд преимуществ перед другими материалами (стеклами и различными полимерами), связанными с механическими свойствами и некоторыми аспектами физики сжатия. На рис. 1 приведен спектр допустимых шероховатостей различных слоев криогенной мишени из пластика [1], который задавался в газодинамических расчетах оценки устойчивости сжатия мишени на установке NIF. Стоит отметить, что наиболее жесткие требования предъявляются к внутренней поверхности и близким к ней слоям.



Рис. 1. Требования к спектру шероховатости различных поверхностей криогенной полимерной капсулы в зависимости от номера сферической гармоники [2]: Inner surface – внутренняя поверхность, Outer surface – внешняя поверхность, Ice – лед, 1st-3rd intenal – 1-3 внутренние слои, Fourier Power – амплитуда Фурье сигнала, Fourier Mode Number – номер Фурье-моды

Из рис. 1 видно, что если оболочка имеет отклонения от идеальной сферы типа «эллиптичность», т. е. мода № 2, то получаем амплитуду отклонения для внешней поверхности оболочки до ≈ 300 нм, а для моды № 10 величина амплитуды отклонения будет, составляет ≈ 5 нм. Требования к допустимой амплитуде моды шероховатости внешней поверхности для более высоких значений мод еще более жесткие от $\approx 1,5$ нм в 12-ой и до $\approx 0,4$ нм в 1000-ой моде.

С учетом этого для мегаджоульной установки, где планируется применять подобные криогенные мишени, были сформулированы требования к параметрам мишени и боксу-конвертору. Для сферических бериллиевых оболочек требуемая шероховатость внешней поверхности составляет 30 нм, а внутренней 10 нм.

Изготовление бериллиевых оболочек, легированных медью

На данный момент существует два основных способа получения бериллиевых оболочек: изготовление полусфер будущей оболочки на ультрапрецизионных специализированных станках с последующим их склеиванием и получение бериллиевых оболочек методом вакуумного нанесения на полимерные оболочки-подложки. Рассматривая недостатки данных методов, стоит отметить, что первый вариант не позволяет получать оболочки с контролируемым профилем концентрации меди по объему сферы. Недостатком второго метода является увеличенное (достигает по расчетам около 5 месяцев) время процесса напыления слоев из-за малых скоростей распыления бериллия, однако особенностью вакуумного напыления является то, что в процессе распыления магнетронных мишеней мы можем варьировать концентрацию меди в слоях бериллия. Исходя из вышесказанного, единственным, реализуемым на сегодняшний день методом получения оболочек из бериллия с требуемой концентрацией меди, является вакуумное нанесение его на сферические полимерные оболочки-подложки с последующим термическим удалением последних [3].

В качестве оболочек использовались: полистирольные сферические оболочки диаметром 1,5–1,8 мм и толщиной стенки 10 мкм, полученные методом вспенивания исходных гранул полистирола в вертикальной печи падения и толстостенные (~30 мкм) полистирольные оболочки диаметром 2,3–2,4 мм, полученные методом микрокапсулирования. Для решения поставленной задачи была спроектирована и изготовлена экспериментальная напылительная установка для напыления специальных материалов. Установка оснащена магнетронным кластером с тремя независимо работающими конфокальными магнетронами (см. рис. 2). При напылении бериллия, сферические оболочки-подложки помещаются в непрерывно вибрирующую чашку, на которую подаются колебания (вдоль оси Z) различной чистоты (от 0,01 до 10 Гц) и интенсивности. При этом оболочки поворачиваются к магнетронным мишеням различными сторонами, и происходит равномерное распределение бериллиевого слоя на поверхности оболочек-подложек.



а б Рис. 2. Внешний вид: а – магнетронный кластер; б – вакуумно-напылительная установка

Учитывая, что к бериллиевой оболочке, как к мишени наполненной ДТ-смесью, предъявляются достаточно жесткие требования к качеству поверхности, толщине стенки и структуре, то нами использовались следующие методы исследования: оптическая интерферометрия; оптическая, атомно-силовая и рентгеновская микроскопия; определение толщины стенки бериллиевой оболочки гравиметрическим методом. Обработка изображения производилась с применением программы GWYDDION.

Для получения бериллиевых оболочек использовались плоские мишени из объемного материала бериллия, но в случае получения оболочек с неравномерно распределенной примесью меди и конструктивными особенностями напылительной установки, возможно, рассмотреть три различных варианта:

– первый, когда в магнетронный кластер устанавливаются две мишени из бериллия и одна мишень из меди, и, варьируя, условия нанесения (подаваемую мощность на магнетрон и др.) подбирается необходимый режим нанесения бериллия и меди. Но в силу того, что различие в коэффициентах распыления бериллия и меди существенно (0,7 против 2,3, при энергии ионов аргона 600 эВ), не удалось подобрать необходимый режим обеспечивающий концентрацию меди на уровне 2 ат.%, даже при минимальной мощности, подаваемой на магнетрон с медной мишенью (минимальная концентрация меди составила 8,45 ат.%). Также уменьшая мощность мы, с одной стороны уменьшаем поток вещества осаждаемого на оболочку и, как следствие, получаем более гладкий слой с низкой шероховатостью, а с другой стороны значительно увеличиваем время (в 1,6 раза по сравнению с чисто бериллиевой оболочкой) получения готовой оболочки с заданной толщиной;

– второй, отличается от первого только тем, что на пути осаждаемого потока вещества устанавливается экран, который отсекает часть потока и дает возможность получить значение легирующей примеси на уровне менее 2 ат.%, но при этом еще больше увеличивается время получения готовой оболочки;

– третий, заключается в использовании магнетронной мишени, представляющей собой плоский диск из бериллиево-медного сплава с известной концентрацией меди на уровне 2 ат.%. В таком случае, варьируя, количество таких мишеней в магнетронном кластере и подаваемую на них мощность, был подобран режим, когда и концентрацию легирующей примеси можно контролировать с высокой точность, и скорость получения готовой оболочки увеличить по сравнению с чисто бериллиевой оболочкой.

Таким образом, первый и третий вариант были экспериментально апробированы и получены данные о влиянии различных технологических параметров напылительной установки, на морфологию поверхности получаемых сферических бериллиевых оболочек, легированных медью. Приведены данные исследования морфологии поверхности и поперечного среза бериллиевых оболочек, легированных медью, а также представлены карта распределения элементов по поверхности поперечного среза и локальный элементный состав. Второй вариант не рассматривался в силу конструктивной невозможности установить экран перед одним из магнетронов, а также из-за слишком низкой скорости (опускается ниже 0,29 мкм/ч) нанесения бериллиево-медного слоя.

Результаты

Интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью с разной концентрацией последней, приведены на рис. 3.

Для сравнения первой приведена бериллиевая оболочка не легированная медью. После легирования бериллиевых оболочек медью, наблюдается ухудшение интерференционной картины, выражающееся в размытии и нарушении интерференционных колец и, как следствие, увеличении параметров шероховатости. Данные интерферограмм подтверждаются АСМизображениями поверхности оболочек. Из литературы известно, что вводя в бериллий примесь меди на уровне единиц (ат.%) происходит замедление роста параметров шероховатости поверхности в сравнении с оболочками из чистого бериллия [4].



Рис. 3. Интерферограммы и ACM-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой не легированной оболочки. Параметры поверхности: R_a=235 нм, rms = 331 нм (пл. анализа 235×176 мкм²); б – ACM-изображение внешней поверхности бериллиевой не легированной оболочки. Параметры поверхности: R_a = 63 нм, rms = 90 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки. Параметры оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 1 Вт). Параметры поверхности: R_a = 82 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); г – ACM-изображение внешней поверхности: R_a = 82 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 235×176 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности: R_a = 333 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности: R_a = 333 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности: R_a = 333 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 1 Вт). Параметры поверхности: R_a = 82 нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 7 Вт). Параметры поверхности: R_a = 333 нм, rms = 468 нм (пл. анализа 235×176 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: R_a = 95 нм, rms = 135 нм (пл. анализа 50×50 мкм²)



Рис. 4. Интерферограммы и ACM-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью и полученных методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be/Cu, Be/Cu, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 252$ нм, rms = 341 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); б – ACM-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be/Cu, Be/Cu, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 119$ нм, rms = 160 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера:Be, Be/Cu, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 219$ нм, rms = 383 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – ACM-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера:Be, Be/Cu, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 219$ нм, rms = 383 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – ACM-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера:Be, Be/Cu, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 219$ нм, rms = 119 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера:Be, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 84$ нм, rms = 119 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности: $R_a = 167$ нм, rms = 240 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 167$ нм, rms = 96 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: R_a 73 нм, rms = 96 нм (пл. анализа 50×50 мкм²)</sup>



Рис. 5. Интерферограммы и ACM-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 167$ нм, rms = 240 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); б – ACMизображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be/Cu (200 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 73$ нм, rms = 96 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be/Cu (150 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 292$ нм, rms = 441 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – ACM-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be/Cu (150 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 292$ нм, rms = 441 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 84$ нм, rms = 115 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be/Cu (100 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 84$ нм, rms = 115 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Be, Be/Cu (100 BT)). Параметры поверхности: $R_a = 84$ нм, rms = 115 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 84$ нм, гms = 115 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 84$ нм, гms = 115 нм (пл. анализа 50×50 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 84$ нм, гms = 357 нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – ACM-изображение внешней поверхности: $R_a = 88$ нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²)</sup>. Параметры поверхности: $R_a = 88$ нм, rms = 118 нм (пл. анализа 50×50 мкм²)</sup>

На рис. 4 и 5 приведены интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности полученных бериллиевых оболочек, легированных медью методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава. В итоге, при легировании бериллиевых оболочек медью происходит увеличение параметров шероховатости поверхности по сравнению с не легированными оболочками. Эффект замедления роста параметров шероховатости при легировании медью обнаружить не удалось. Данный вопрос требует проведения отдельных дополнительных исследований. В ситуации с бериллиевыми оболочками, легированными медью методом распыления бериллиевомедной мишени, прослеживается похожая тенденция к увеличению параметров шероховатости поверхности с увеличением подаваемой мощности на магнетрон с мишенью из сплава и количеством этих мишеней в кластере.

Рассмотрение структурно-морфологических свойств логичнее всего начать с анализа магнетронных мишеней, с которых проводилось нанесение бериллиевого и бериллиево-медного слоя. Бериллий плохо идентифицируется стандартными методиками ввиду малой плотности (1,848 г/см³) и низкого атомного номера. Но если в анализируемом образце мишени присутствуют примеси более тяжелых элементов, то возможно провести полуколичественный анализ и отследить их след в получаемых бериллиевых оболочках, при условии того, что материал мишени полностью переносится при распылении на подложку.

На рис. 6 представлены изображения спектров мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава. Рассматривая результаты, можно отметить, что все спектральные линии соответствуют друг другу и значительного количества (не более 5 %) примеси, как в «чистых» образцах, так и в мишени из сплава не наблюдается.

На рис. 7 представлены изображения поверхности магнетронных мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава снятые в атомном контрасте. Для мишени из бериллия видны локальные неоднородности, связанные с распределением примесей в матрице мишени в основном на границах раздела бериллиевых зерен. Латеральный размер зерен варьируется от 10 до 30 мкм, что характерно для металлического поликристаллического бериллия [5], полученного вакуумным горячим прессованием. Для мишени из меди при исследовании поверхности, включений и выделений в структуре материала мишени не обнаружено.



Рис. 6. Спектры мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава



Рис. 7. Микроструктура поверхности магнетронных мишеней в атомном контрасте: а – бериллий, б – медь, в – бериллиево-медный сплав

Мишень из бериллиево-медного сплава характеризуется значительной структурной неоднородностью из-за неравномерного распределения меди в объеме материала мишени. Плотность материала сплава составила 2,068 г/см³, что соответствует содержанию меди на уровне 12,5 масс.%. Определение среднего элементного состава мишеней проводили в нескольких локальных участках размерами от 180×180 мкм² до 1100×1100 мкм².

Аналогичным образом проводился анализ карт распределения элементов, как со всей площади поперечного среза оболочки, так и с областей меньшего размера (области с различного рода артефактами и отдельные слои). В табл. 1 представлены данные элементного состава бериллиево-медного слоя. Под конфигурацией «обр. 20 Вт на магнетрон» подразумевается, что в магнетронном кластере находилось две мишени Ве с подаваемой на них мощностью 200 Вт и одна мишень из Си с подаваемой на нее мощностью 20 Вт. В случае конфигурации «Конф. Ве. Ве. Ве/Си (150 Вт)» подразумевается, что в магнетронном кластере находилась две мишени из Ве и одна мишень из сплава Ве/Си, подаваемая мощность на все мишени составляла 150 Вт (по умолчанию мощность составляла 200 Вт, например «Конф. Ве. Ве/Си. Ве/Си»).

Элементный состав примесей в бериллиево-медном слое всех образцов

Обозначение	Массовое содержание, %								
Obosnatenne	Be	Cu	0	Ar	Al*	Si [*]	Cr	Fe	W
Мишень Ве	основа		0,5	-	-	-	>0,1	0,14	>0,1
Мишень Си	-	основа	-	-	-	-	-	-	-
Мишень из сплава Ве/Си	основа	12,2	1,2	-	-	-	-	0,1	-
Обр. 20 Вт на магнетрон	основа	58,0	1,4	>0,1	0,7	>0,1	-	-	-
Обр. 10 Вт на магнетрон	основа	50,0	2,5	-	2,5	-	-	-	-
Обр. 7 Вт на магнетрон	основа	49,1	2,5	-	0,7	-	-	-	-
Обр. 3 Вт на магнетрон	основа	43,4	2,8	-	1,8	-	-	-	-
Обр. 1 Вт на магнетрон	основа	39,4	3,7	-	2,2	-	-	-	-
Конф. Be/Cu. Be/Cu. Be/Cu	основа	11,8	3,3	-	-	-	-	-	-
Конф. Be. Be/Cu. Be/Cu	основа	9,8	2,2	-	-	-	-	-	-
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (200 Вт)	основа	7,1	2,4	-	-	-	-	-	-
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (150 Вт)	основа	5,2	2,1	-	_	-	_	-	-
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (100 Вт)	основа	4,7	2,6	-	-	-	_	0,2	-

Таблица 2

Данные измерений толщины бериллиево-медного слоя и расчет средней скорости напыления слоя

Обозначение	Концентрация меди в слое, масс.% (ат.%)	Толщина бериллиево- медного слоя, мкм.	Средняя скорость напыления слоя, мкм/ч.
Обр. 20 Вт на магнетрон	58,0 (16,38)	$2,22 \pm 0,15$	0,44
Обр. 10 Вт на магнетрон	50,0 (12,43)	$1,89 \pm 0,15$	0,38
Обр. 7 Вт на магнетрон	49,1 (12,04)	$1,85 \pm 0,15$	0,37
Обр. 3 Вт на магнетрон	43,4 (9,81)	$1,56 \pm 0,15$	0,31
Обр. 1 Вт на магнетрон	39,4 (8,45)	$1,43 \pm 0,15$	0,29
Конф. Be/Cu. Be/Cu. Be/Cu	11,8 (1,86)	$3,81 \pm 0,15$	0,76
Конф. Be. Be/Cu. Be/Cu	9,8 (1,52)	$3,56 \pm 0,15$	0,71
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (200 Вт)	7,1 (1,07)	$3,47 \pm 0,15$	0,69
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (150 Вт)	5,2 (0,77)	$2,91 \pm 0,15$	0,58
Конф. Ве. Ве. Ве/Си (100 Вт)	4,7 (0,65)	$2,16 \pm 0,15$	0,43

Исходя из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать выводы, что в мишенях кроме основных элементов бериллия (Be) и меди (Cu), присутствует определенный набор примесей, который почти полностью повторяется во всех образцах на неизменном уровне, за исключением кислорода, содержание которого достигает значений в 3,3 %.

Такое повышенное содержание кислорода в оболочках можно объяснить незначительным окислением бериллия после окончания процесса напыления, что выражается в локализации кислорода преимущественно в межслойных границах. Однако, влияние частичного окисления поверхности бериллиевого слоя требует отдельных дополнительных исследований. Методом со-распыления бериллиевой и медной мишени (в соотношении 2/1) в зависимости от подаваемой мощности на медную мишень удалось получить бериллиево-медный слой с концентрацией меди от 8,45 до 16,38 ат.%. Подаваемая мощность на медную мишень варьировалась от 1 до 20 Вт, на две бериллиевые мишени была постоянной и составляла 200 Вт. Кроме основного набора примесей характерных для мишени у оболочек регистрируются незначительное содержание алюминия (Al) и кремния (Si), данные примеси, скорее всего, тоже связаны с мишенью.

Также для каждого образца, по изображениям поперечного среза, были посчитаны общая толщина оболочки, толщина бериллиево-медного слоя и проведен расчет скорости напыления бериллиевомедного слоя. Для каждого образца была проведена оценка не только средней скорости напыления бериллиево-медного слоя, но и анализ зависимости скорости напыления от подаваемой мощности и конфигурации магнетронного кластера. В табл. 2 приведены данные измерений толщины бериллиевомедного слоя и скорости напыления слоя для всех исследованных образцов.

Из данных представленных в табл. 2 следует, что:

 – для получения бериллиево-медного слоя методом со-распыления бериллиевой и медной мишени, зависимость характеризуется закономерным [6] увеличением скорости напыления, при повышении



Рис. 8. Внешний вид установки для полировки полимерных оболочек [7]: Capsule – оболочка, Holder – держатель, Pad – диск



Рис. 9. Схематичный вид поперечного среза одной из гильз для загрузки оболочки [7]: Loading Spheres – шарики нагрузки, CH Capsule – полимерная оболочка, Interior Septum – внутренний тефлоновый держатель, Exterior Septum – внешний стеклянный держатель, Pad – диск с абразивной поверхностью, Colloidal Silica Slurry – коллоидальная кварцевая суспензия

Таблица 3

Значения средних параметров шероховатости внешней поверхности бериллиевых оболочек до и после полировки

Обозначение		Номер операции				
		до по-	2-цикл полир.	3-цикл полир.		
		лир.	«м. шарик»	«м. шарик»		
Оболочка № 1	Ra, нм	782	-	-		
	rms, нм	1039	-	-		
Оболочка № 2	Ra, нм	842	194	197		
	rms, нм	1189	308	427		
Оболочка № 3	Ra, нм	880	147	-		
	rms, нм	1222	225	_		

мощности и принимает значения 0,29, 0,31, 0,37, 0,38 и 0,44 мкм/ч при подаваемой мощности на медный магнетрон 1, 3, 7, 10 и 20 Вт;

– для получения бериллиево-медного слоя методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава с известной концентрацией меди, зависимость также характеризуется закономерным увеличение скорости напыления, как при повышении мощности, так и при увеличении количества установленных в магнетронный кластер мишеней из сплава. Использование мишени из сплава позволило получить бериллиевые оболочки, легированные медью с концентрацией до 2 ат.% и увеличить среднюю скорость напыления до 0,76 мкм/ч, что в 1,7 раза выше, чем в случае с чисто бериллиевой оболочкой.

Как было показано ранее, с увеличением толщины стенки бериллиевой оболочки параметры шероховатости поверхности возрастают и достигают значений порядка единиц микрон для готовой оболочки, тогда как условия применимости оболочки в качестве мишени соответствует значению средней шероховатости внешней поверхности менее 30 нм. В силу малых размеров (до 2,5 мм) и хрупкости оболочек, как полимерных, так и бериллиевых в качестве основного метода полировки было выбрано плоское полирование на кругах с различным абразивом рис. 9.

Данный метод плоского полирования применим, как к полимерным оболочкам, так и к оболочкам из металла (Ti, Be) [7] и высокоплотного углерода [8]. На рис. 8 представлен внешний вид установки для полировки полимерных оболочек. Установка представляет собой опорную плиту с гладкой поверхностью, на которой располагается вращающаяся с переменной скоростью стеклянная подложка. В подложке имеются отверстия с фторопластовыми проставками для загрузки оболочек. Процесс полировки заключается в следующем: в отверстие загружается оболочка и сверху нагружается сферическими шариками. Далее в область контакта оболочки и опорной плиты непрерывно подается суспензия абразива на основе мелких частиц оксида кремния и запускается



Рис. 10. Фотография бериллиевых оболочек: а – не обработанная, б, в – после полировки

вращение стеклянной подложки. За счет нагружения шариками происходит взаимодействие абразива с поверхностью оболочки и снятием материала, а вращательные движения подложки постоянно поворачивают оболочку для равномерной обработки. Результаты полировки образцов представлены в табл. 3.

Для сравнения на рис. 10 представлена фотография трех бериллиевых оболочек. Если смотреть слева-направо, то сначала идет не подвергнутая обработке оболочка, потом 2-ая и 3-ья бериллиевые оболочки.

Таким образом, можно заключить, что разработанная нами схема полировки бериллиевых оболочек правильная и в дальнейшем будет совершенствоваться и использоваться для получения оболочек, не только бериллиевых, с требуемым качеством поверхности.

Литература

1. Clark D. S., Haan S. W., Cook A. W. et al., Physics of Plasmas 18, 082701 (2011).

2. Haan S. W., Lindl J. D., Callahan D. A. et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // Phys. Plasmas. -2011. -Vol. 18. -P.051001 1-47.

3. Hammel B. A. et al. High Energy Density Physics 6. 2010.P 171-178.

4. Zhou Min-jie, Luo Bing-chi, LI Kai, et al. / Microstructure evolution of copper doped beryllium thin films // Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22(2012) 1151–1155.

5. Берман С. И. Меднобериллиевые сплавы, их свойства применение и обработка. -М: Металлургия, 1966.

6. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твердых тел. Пер. с англ. / Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1985. – 336 с

7. Surawata T. I., Steele W. A., Feit M. D. et.al. Tumble finishing of CH capsules. - 20th Target fabrication meeting. Santa Fe, May 24, 2012.

8. Requieron, Huang H., Hoover D. E. et. al. - Characterization of high density carbon capsules. - 21th Target fabrication meeting. Las Vegas, Nevada, June 21-25, 2015.

ВИБРАЦИОННО ИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ МЁССБАУЭРОВСКОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

<u>И. Р. Хайрулин,</u> Е. В. Радионычев, В. А. Антонов

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

В конце 70-х – начале 90-х годов XX века были обнаружены эффекты когерентного пленения населённостей (КПН) и электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) [1], [2]. В видимом и ближнем инфракрасном диапазоне частот указанные эффекты нашли многочисленные приложения в прецизионной спектроскопии, хронометрии, магнитометрии и квантовых информационных технологиях. В диапазоне жёсткого рентгеновского / гаммаизлучения с энергией фотонов 10-100 кэВ реализация ЭИП и КПН на сегодняшний день не представляется возможной в виду отсутствия когерентных источников излучения достаточной интенсивности. Однако, в данном спектральном диапазоне возможна реализация эффекта вибрационно-индуцированной прозрачности (ВИП) [3], который может стать альтернативой ЭИП и КПН в рентгеновском / гаммадиапазоне.

Эффект ВИП заключается в уменьшении поглощения резонансного электромагнитного излучения в двухуровневой среде, совершающей акустические колебания вдоль направления распространения излучения. Механические колебания поглотителя приводят к модуляции частоты резонансного квантового перехода ядер среды вследствие эффекта Доплера и обогащению спектра резонансной поляризации среды комбинационными частотами, отстоящими друг от друга на частоту колебаний поглотителя. В случае квазимонохроматического падающего излучения, варьируя амплитуду колебаний, можно свести к минимуму резонансный отклик среды, а увеличивая частоту колебаний, добиться пренебрежимо слабого резонансного поглощения поля.

Данная работа посвящена исследованию возможностей реализации эффекта ВИП в мёссбауэровском поглотителе ⁵⁷Fe для гамма-излучения с энергией фотонов 14,4 кэВ. Эксперимент по наблюдению ВИП рассматриваемого поглотителя для излучения радиоактивного мёссбауэровского источника ⁵⁷Co может быть выполнен в двух вариантах:

 а) с использованием метода стробирования, когда происходит отбор детектируемых фотонов с привязкой к определённой начальной фазе колебаний поглотителя [4],

б) без использования стробирования, когда статистика фотонов формируется за счёт всех детектируемых фотонов. При использовании мёссбауэровского радиоактивного источника гамма-излучения второй вариант, как правило, требует существенно меньшего времени сбора данных по сравнению с первым.

В то же время, при использовании, так называемого, синхротронного мёссбауэровского источника фотонов [5], [6] можно реализовать первый вариант эксперимента, не прибегая к стробированию вследствие периодичности следования импульсов излучения. При этом постановка эксперимента также не потребует много времени. Далее последовательно рассмотрим особенности обеих постановок эксперимента.

Рассмотрим колебания поглотителя как целого вдоль направления распространения излучения, так что координаты ядер в лабораторной системе отсчёта (ось z) и в системе отсчёта поглотителя (ось z_a) связаны соотношением

$$z_a = z + R \cdot \sin\left(\Omega t + \vartheta_0\right),\tag{1}$$

где ось z направлена вдоль направления распространения гамма-излучения, R – амплитуда колебаний поглотителя, $\Omega/(2\pi)$ – частота колебаний, а ϑ_0 – начальная фаза колебаний. Рассмотрим случай использования привязки измерений к начальной фазе колебаний поглотителя ϑ_0 . Как показано в работе [7] в системе отсчёта, связанной с вибрирующим поглотителем, электрическое поле фотона на выходе из резонансного мёссбауэровского поглотителя можно представить в виде интеграла свёртки поля фотона. падающего на поглотитель $E_{s}(\tau_{a}) =$ $= E_0 \theta(\tau_a) \exp\left\{-(i\omega_s + \Gamma_s/2)\tau_a + ip\sin\left(\Omega\tau_a + \vartheta_0\right)\right\}, \quad \mathbf{H}$ передаточной функции отклика поглотителя $a(\tau_a)$:

$$E_{out}(\tau_a) = \int_{-\infty}^{\infty} a \left(\tau_a - \tau_a' \right) E_s \left(\tau_a' \right) d\tau_a', \qquad (2)$$

в котором

$$a(\tau_{a}) = e^{-T_{e}/2} \times \left[\delta(\tau_{a}) - \frac{T_{M}\gamma_{a}}{2}e^{-(i\omega_{a}+\gamma_{a})\tau_{a}} \frac{J_{1}\left(2\sqrt{\frac{T_{M}\gamma_{a}}{2}\tau_{a}}\right)}{\sqrt{\frac{T_{M}\gamma_{a}}{2}\tau_{a}}}\theta(\tau_{a})\right], (3)$$

где $\tau_a = t - z/c$ – локальное время в системе отсчёта фотона, прошедшее с момента формирования возбуждённого состояния ядра источника; $p = 2\pi R/\lambda_s$ – индекс модуляции (нормированная на длину волны резонансного излучения, λ_s , амплитуда колебаний поглотителя); Т_м – мёссбауэровская толщина поглотителя, Т_е – декремент фотоэлектронного поглощения, характеризующий нерезонансные потери поля. В случае поглотителя из нержавеющей стали, представляющего из себя соединение Fe:Cr:Ni в процентном соотношении 70:19:11, и 90 % обогащённого резонансными ядрами ⁵⁷Fe $T_e = T_M / 180$. $\Gamma_s = 1/T_s$ – ширина спектральной линии источника, $T_s = 141$ нс – естественное время жизни возбуждённого состояния излучающего ядра; ω_s – центральная частота источника (соответствующая длине волны $\lambda_s = 2\pi c/\omega_s =$ = 0,86 Å); ω_a и γ_a – резонансная частота и полуширина спектральной линии поглотителя, соответственно, при чём, так как поглотитель и источник резонансно взаимодействуют на одном и том же переходе, можно положить $\gamma_a = \Gamma_s/2$.

В работе [3] показано, что необходимыми условиями наблюдения вибрационно-индуцированной прозрачности являются:

а) равенство центральной частоты источника и резонансной частоты поглотителя $\omega_s = \omega_a \equiv \omega$,

б) значение индекса модуляции p = 2, 4, соответствующее первому нулю функции Бесселя нулевого порядка: $J_0(2,4) \simeq 0$. С учётом этих условий электрическое поле гамма-фотона на выходе из резонансного поглотителя после некоторых преобразований примет вид:

$$E_{out}(\tau_{a}) =$$

$$= E_{0}\theta(\tau_{a})e^{-(i\omega+\Gamma_{s}/2)\tau_{a}}e^{-T_{e}/2}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_{n}(p)e^{in(\Omega\tau_{a}+\vartheta_{0})}\times$$

$$\times \left[1 - \int_{0}^{\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}}}J_{1}(x)\exp\left\{-\frac{in\Omega x^{2}}{T_{M}\Gamma_{s}}\right\}dx\right].$$
(4)

Согласно (4) электрическое поле фотона на выходе из поглотителя в вибрирующей системе отсчёта можно представить в виде совокупности спектральных компонент с амплитудами, пропорциональными $J_n(p)$, отстоящих друг от друга на частоту колебаний поглотителя Ω (рис. 1). Отсюда видно, что при значении индекса модуляции p = 2, 4 в спектре падающего поля отсутствует центральная компонента с номером n = 0, которая находится в резонансе с поглотителем. Тем самым резонансное взаимодействие поля фотона с поглотителем практически отсутствует. Однако вследствие конечной величины ширины спектральных линий поглотителя и источника при конечном значении частоты колебаний происходит частичное перекрытие крыльев этих спектральных линий. Из-за этого в волновой форме фотона,



Рис. 1. Спектр поля фотона на выходе из резонансного поглотителя с мёссбауэровской толщиной $T_M = 5,2$ в системе отсчёта, связанной с поглотителем, который совершает гармонические колебания вдоль направления распространения фотона с частотой 10,2 МГц и амплитудой 3 · 10⁻¹¹ м, соответствующей индексу модуляции p = 2.4 (сплошная кривая относится к левой вертикальной оси) и спектральная линия поглощения (коэффициент пропускания) мёссбауэровского поглотителя, который настроен в резонанс с частотой поля фотона (пунктирная кривая относится к правой вертикальной оси)

представляющей собой временную зависимость вероятности детектирования фотона, пропорциональную интенсивности поля фотона $I_{out}(\tau_a) = c \left| E_{out}(\tau_a) \right|^2 / (8\pi)$, возникают искажения, приводящие к модификации волновой формы падающего на поглотитель фотона: $I_s(\tau_a) = I_0 \exp\{-\Gamma_s \tau_a\}$.

При достаточно высокой частоте колебаний поглотителя, когда $T_M \Gamma_s / \Omega <<1$, можно произвести оценку входящего в (4) интеграла и, после перегруппировки слагаемых, получить следующее выражение для поля гамма-фотона на выходе из резонансного поглотителя:

$$E_{out}(\tau_{a}) \approx E_{0}\theta(\tau_{a})e^{-(i\omega+\Gamma_{s}/2)\tau_{a}}e^{-T_{e}/2} \times \\ \times \left\{ \sum_{\substack{n=-\infty\\n\neq 0}}^{\infty} J_{n}(2,4)\left(1+\frac{i}{2}\frac{T_{M}\Gamma_{s}}{n\Omega}\right)e^{in(\Omega\tau_{a}+\vartheta_{0})} - \frac{iT_{M}\Gamma_{s}}{2\Omega}\frac{J_{1}\left(\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}}\right)}{\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}}}\sum_{\substack{n=-\infty\\n\neq 0}}^{\infty}\frac{J_{n}(2,4)}{n}e^{in\vartheta_{0}} \right\}.$$
 (5)

Из полученного выражения (5) видно, что влияние поглотителя сводится к двум эффектам:

а) фаза и амплитуда каждой спектральной компоненты падающего поля вследствие влияния крыльев спектральной линии поглотителя изменяется, что описывается добавочным членом $iT_M\Gamma_s/(2n\Omega)$;

б) появляется когерентно рассеянное поле на резонансной частоте, которое возникает вследствие

интерференции крыльев спектральных компонент поля падающего фотона в системе отсчета вибрирующего поглотителя.

Очевидно, что для уменьшения искажений поля фотона вследствие резонансного взаимодействия с поглотителем необходимо уменьшить величину этих добавочных членов.

Обращает на себя внимание тот факт, что когерентно рассеянное поле на частоте резонанса может быть равным нулю. Связано это с тем, что при определённом значении начальной фазы колебаний поглотителя происходит деструктивная интерференция амплитуд возбуждения поглотителя спектральными компонентами поля фотона, что продемонстрировано на рис. 2, на котором представлена зависимость амплитуды когерентно рассеянного резонансного поля на выходе из вибрирующего поглотителя:

$$A_0 = \sum_{\substack{n=-\infty \ n \neq 0}}^{\infty} J_n(2,4) e^{in \vartheta_0} / n$$
. Видно, что при начальной

фазе колебаний поглотителя $\vartheta_0 = \pi/2$ амплитуда этого поля обращается в нуль. Рис. 3 наглядно демонстрирует уменьшение искажений волновой формы фотона при оптимальном выборе начальной фазы колебаний.

Дальнейшее уменьшение влияния поглотителя может быть реализовано только с уменьшением отношения T_M / Ω . Это означает, что величина искажений, которую можно определить как максимальное отклонение волновой формы выходного фотона от экспоненциальной временной зависимости $\Delta(\Omega, T_M, \vartheta_0) = \max \{ I_{out}(\tau_a) / I_0 - e^{-(T_e + \Gamma_s \tau_a)} \},$ останется неизменной при пропорциональном увели-



Рис. 2. Зависимость амплитуды когерентно рассеянного поля на частоте резонанса $\omega_s = \omega_a$ от начальной фазы колебаний поглотителя



Рис. 3. Временная зависимость нормированной вероятности детектирования фотона на выходе из резонансного поглотителя с мёссбауэровской толщиной $T_M = 5, 2$: сплошная кривая соответствует оптимальному значению начальной фазы колебаний $\vartheta_0 = \pi/2$; точечная кривая описывает случай $\vartheta_0 = 0$; штрихпунктирная кривая описывает волновую форму падающего фотона; пунктирная кривая соответствует волновой форме резонансно поглощённого фотона на выходе из покоящегося поглотителя с тем же значением мёссбауэровской толщины $T_M = 5, 2$. Поглотитель совершает гармонические колебания с частотой 10,2 МГц; индекс модуляции p = 2, 4



Рис. 4. Зависимость искажений волновой формы гамма-фотона $\Delta(\Omega, T_M, \vartheta_0)$ на выходе из осциллирующего резонансного поглотителя в условиях эффекта ВИП. Индекс модуляции p = 2, 4, начальная фаза колебаний $\vartheta_0 = \pi/2$

чении оптической толщины поглотителя и частоты его колебаний. Такая же зависимость наблюдается при анализе точного решения (4). На рис. 4 представлена зависимость $\Delta(\Omega, T_M, \vartheta_0 = \pi/2)$, по которой видно, что в области малых значений T_M/Ω наблюдаются линии уровня типа прямых, на которых величина искажений волновой формы оказывается одинаковой. Это позволяет ожидать, что эффект ВИП можно наблюдать в толстом поглотителе при достаточно высокой частоте его колебаний. На сегодняшний день экспериментально достижимой частотой колебаний поглотителя является 970 МГц, которую можно получить, используя алмазный пьезопреобразователь [8]. В то же время, второпластовые пьезопреобразователи позволяют получить частоту гармонических колебаний вплоть до 24 ГГц [9]. Это позволяет обеспечить практически полную резонансную прозрачность используемых в экспериментах поглотителей ($\Delta(\Omega, T_M, \vartheta_0 = \pi/2) < 10^{-3}$ для $T_M \approx 100$).

Перейдём теперь ко второму варианту постановки эксперимента, когда привязка к начальной фазе колебаний поглотителя не производится. В этом случае волновую форму фотона на выходе из резонансного поглотителя необходимо усреднить по начальной фазе колебаний, равномерно распределённой в интервале от 0 до 2π . Связано это с тем, что в рассматриваемом случае фронту волновой формы спонтанно излученного фотона соответствует случайный момент времени, а значит и случайная начальная фаза колебаний поглотителя. Таким образом, волновую форму фотона в этом случае можно описать следующим образом:

$$< I_{out}(\tau_a) >_{\vartheta_0} = \frac{c}{8\pi} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \left| E_{out}(\tau_a) \right|^2 d\vartheta_0$$
 (6)

Подставляя в (6) выражение для поля фотона на выходе из поглотителя (4) и используя соотношение 2π

 $\int_{0}^{n} e^{i(n-k)\vartheta_{0}} d\vartheta_{0} = 2\pi \delta_{nk}$, где δ_{nk} – символ Кронеке-

ра, после некоторых преобразований получим:

$$< I_{out}(\tau_{a}) >_{\vartheta_{0}} = I_{0}\theta(\tau_{a})e^{-(I_{e}+\Gamma_{s}\tau_{a})} \times \times \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{n}^{2}(p) \left| 1 - \int_{0}^{\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}}} J_{1}(x)e^{-\frac{in\Omega x^{2}}{T_{M}\Gamma_{s}}} dx \right|^{2}.$$

$$(7)$$

Будем полагать, что частота колебаний поглотителя велика так, что $T_M \Gamma_s / \Omega <<1$. Тогда интеграл под модулем в (7) можно оценить также, как это было сделано в (5), и, оставляя линейные слагаемые относительно малого параметра $T_M \Gamma_s / \Omega$, получим следующее выражение для усреднённой по начальной фазе колебаний волновой формы выходного фотона:

$$< I_{out}(\tau_{a}) >_{\mathfrak{H}_{0}} = I_{0}\theta(\tau_{a})e^{-(I_{e}+I_{s}\tau_{a})} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{2T_{M}\Gamma_{s}}{\Omega} \cdot \frac{J_{1}(\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}})}{\sqrt{T_{M}\Gamma_{s}\tau_{a}}} \sum_{n=1}^{\infty} J_{n}^{2}(p)\frac{\sin(n\Omega\tau_{a})}{n} \right\}.$$
(8)

На рис. 5 представлена волновая форма фотона на выходе из поглотителя, посчитанная с помощью решения (7) и (8) при экспериментально достижимых значениях параметров [4]: $T_M = 5, 2,$ $\Omega/(2\pi) = 10, 2 M \Gamma ц$. Видно хорошее согласие между этими решениями. А значит, можно утверждать, что в данной постановке эксперимента по наблюдению эффекта вибрационно индуцированной прозрачности единственным способом уменьшения искажений волновой формы фотона является уменьшение отношения $T_M \Gamma_s / \Omega$.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены основные особенности эффекта вибрационно индуцированной



Рис. 5. Временная зависимость вероятности детектирования фотона в случае постановки эксперимента без стробирования: сплошная кривая соответствует точному решению (7), вычисленному при $T_M = 5, 2$, $\Omega/(2\pi) = 10, 2 \,\mathrm{MFu}$, p = 2, 4; точечная кривая описывает аналитическое решение (8) при тех же значениях параметров; штрихпунктирная кривая соответствует случаю волновой формы фотона на входе в поглотитель; пунктирная линия представляет собой волновую форму фотона в случае покоящегося поглотителя, той же толщины

прозрачности в мёссбауэровском поглотителе ⁵⁷Fe для гамма-излучения с энергией фотонов 14,4 кэВ в рамках двух возможных постановках эксперимента:

a) с использованием метода стробирования при детектировании фотонов на выходе из поглотителя,

б) без стробирования. На основе численного и аналитического исследований показано, что вследствие конечности ширины спектральных линий источника и поглотителя экспоненциально затухающая волновая форма падающего на поглотитель фотона искажается, приобретая амплитудную модуляцию. При обеих постановках эксперимента величина искажений уменьшается при уменьшении отношения T_M/Ω , посредством увеличения частоты колебаний поглотителя и/или уменьшения его мёссбауэровской толщины. Кроме того, в случае измерения волновой формы фотона с привязкой к определённому значению начальной фазы колебаний (с использованием стробирования) существует оптимальное значение начальной фазы колебаний $\vartheta_0 = \pi/2$, при котором искажения волновой формы фотона оказываются минимальными в силу того, что когерентно рассеянное поле на частоте резонанса, возникающее вследствие перекрытия крыльев спектральных компонент равно нулю.

Литература

1. Alzetta G., Gozzini A., Moi L., Orriols G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour // Il Nuovo Cimento B. 1976, Vol. 36, N 1, P. 5-20;

2. Harris S.E., Field J.E., Imamoğlu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency // Phys. Rev. Lett. 1990, Vol. 64, N 10, P. 1107;

3. Radeonychev Y.V., Tokman M.D., Litvak A.G., Kocharovskaya O.A. Acoustically induced transparency in optically dense resonance medium // Phys. Rev. Lett. 2006, Vol. 96, N 9, P. 093602;

4. Vagizov F.G., Antonov V.A., Radeonychev Y.V., Shakhmuratov R.N., Kocharovskaya O.A. Coherent control of the waveforms of recoilless γ -photons // Nature. 2014, Vol. 508, N 7494, P. 80-83;

5. Mitsui T., Masuda R., Seto M., Hirao N. Variable-bandwidth ⁵⁷Fe Synchrotron Mössbauer Source // J. Phys. Soc. Jpn. 2018, Vol. 87, N 9, P. 093001;

6. Potapkin V., Chumakov A.I., Smirnov G.V., Ruffer R., McCammon C., and Dubrovinsky L. Angular, spectral, and temporal properties of nuclear radiation from a ⁵⁷Fe synchrotron Mossbauer source // Phys. Rev. A. 2012, Vol. 86., N, P. 053808;

7. Ikonen E., Helistö P., Katila T., Riski K. Coherent transient effects due to phase modulation of recoilless γ radiation // Phys. Rev. A. 1985, Vol. 32, N 4, P. 2298-2315;

8. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Volkov A.P., Bormashov V.S., Aksenenkov V.V., Kuznetsov M.S., Gordeev G.I., Telichko A.V. AlN/single crystalline diamond piezoelectric structure as a high overtone bulk acoustic resonator // Appl. Phys. Lett. 2013, 102, 113507;

9. Ambrosy A., Holdik K. Piezoelectric PVDF films as ultrasonic transducers // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1984, Vol. 17, N 10, P. 856.

СЕКЦИЯ 1

Теоретическая и математическая физика

Председатели секции: д-р. физ.- мат. наук Ю. Н. Дерюгин д-р. физ.- мат. наук В. А. Жмайло

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В 3D и 2D ПОСТАНОВКЕ

<u>Н. А. Андреюк</u>, А. И. Голубев, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов

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

Введение

Пучки заряженных частиц с энергией порядка десятков ГэВ используются для различных научных и медицинских приложений. С целью их получения создаются ускорительные комплексы внушительных размеров. Причем для дальнейшего увеличения энергии ускоряемых частиц, приходится использовать все более масштабные установки. Например, по проекту Международного линейного коллайдера (ILC) предполагается, что для получения ускоренных лептонов с энергией 500 ГэВ, ускоритель должен быть длиной 40 км. Необходимость таких больших размеров вызвана тем, что существует ограничение сверху на поля, ускоряющие частицы в таких установках. Чтобы не допустить электрического пробоя среды, напряженность электрического поля в ускообычно рителях не превышает значений $10^4 - 10^5 \,\mathrm{B/cm}$.

Однако, существуют альтернативные методы ускорения частиц в лазерных полях и в полях разделения зарядов в плазме, лишенные ограничений, связанных с пробоем среды, например, лазерноплазменные ускорители электронов [1]. Напряженность ускоряющего поля, создаваемого в плазменных ускорителях, достигает значений порядка 10⁹-10¹⁰ В/см при длине ускорения от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Рекордной, на настоящий момент, является энергия 4,2 ГэВ у электронов, ускоренных в плазме на длине 9 см лазерным излучением мощностью 300 ТВт [2]. При этом способе ускорения мощный короткий лазерный импульс, распространяясь в докритической плазме, возбуждает волну колебаний электронной плотности, идущую вслед за ним. В результате в плазме генерируются продольные электрические поля, ускоряющие электроны. Так как процесс возбуждения электронной плазменной волны лазерным импульсом в чем-то аналогичен возбуждению кораблем волн на поверхности воды, то их принято называть кильватерными.

В данной работе представлен анализ результатов 3D и 2D численного моделирования ускорения электронов в плазменной кильватерной волне. Расчеты были проведены при помощи разработанного во ВНИИЭФ трехмерного параллельного релятивистского кода PLASMA-3P (3D3V), основанного на методе «частиц-в-ячейке». Код PLASMA-3Р является дальнейшим развитием двумерного кода PLASMA-2P [3]. Численное моделирование было проведено для различных режимов генерации плазменной кильватерной волны. Моделирование проводилось в двумерной и трехмерной постановках с целью выяснить – существуют ли значимые отличия результатов 2D и 3D моделирования.

Возбуждение кильватерной волны лазерным импульсом. Основные особенности режима кильватерного ускорения электронов

Кильватерная волна возбуждается в плазме под воздействием ультракороткого, мощного (порядка $10^{18}-10^{20}$ Bt\cm²) лазерного излучения, либо пучка высокоэнергетичных электронов. Она представляет собой череду сгущений и разрежений электронной плотности, следующей за «драйвером» (лазерным импульсом или электронным сгустком). В данной работе моделируется первый способ генерации кильватерной волны, который впервые был предложен в 1979 г. в работе [4]. На рис. 1 схематично изображен первый период плазменной кильватерной волны.



Рис. 1. Схема ускорения электронов в плазменной кильватерной волне



Рис. 2. Распределения плотности электронов плазменной кильватерной волне, полученные в трехмерных расчётах при разной интенсивности лазерного импульса: а – нелинейный профиль кильватерной волны, полученный в при интенсивности лазерного импульса 1×10¹⁹ Вт/см², б – профиль волны, характерной для *bubble*-режима ускорения, интенсивность лазерного излучения в данном случае составляет 2×10¹⁹ Вт/см²

Электроны обозначены маленькими кружками, ионы – большими со знаком «плюс». Лазерный импульс распространяется справа налево и отмечен большой стрелкой. Изогнутыми стрелками показано направление разлета электронов.

На рис. 1 большой стрелкой отмечен лазерный импульс, маленькими кружками показаны электроны плазмы, большими со знаком «плюс» – ионы.

Как видно из рис. 1, распространяясь в плазме докритической плотности, лазерный импульс вытесняет электроны из области взаимодействия излучения с плазмой за счет действия пондеромоторной силы $\overrightarrow{F_n} \sim -\overrightarrow{\nabla I}$. Положительно заряженные ионы остаются, при этом, практически неподвижны. Таким образом, позади лазерного импульса образуется зона избыточного положительного заряда, которая в свою очередь, начинает притягивать электроны обратно. Вследствие чего, в плазме возбуждаются колебания плотности электронов, следующие за лазерным импульсом. Эта плазменная волна, которую еще называют кильватерной, совершает колебания с плазменной частотой $\omega_{pl} = (4\pi n_e e^2/m_e)^{1/2}$, где n_e – начальная плотность электронов плазмы, *е* – заряд, *m_e* – масса электрона и распространяется с фазовой скоростью равной групповой скорости лазерного импульса:

$$\upsilon_{ph} = \upsilon_g \approx c \sqrt{\left(1 - \omega_p^2 / \omega_0^2\right)} \tag{1}$$

где с – скорость света, ω_0 – несущая частота лазерного импульса. В область избыточного положительного заряда, вследствие самоинжекции, могут попасть фоновые электроны плазмы и под действием продольного ускоряющего поля набрать энергию от сотен до нескольких тысяч МэВ. При этом, находясь в ускоряющей фазе, электроны постоянно набирают скорость, стремясь к скорости света $\upsilon_e \rightarrow c$. Скорость плазменной волны остается постоянной. В результате, электроны могут обогнать плазменную волну и перейти в область с тормозящим продоль-

ным электрическим полем. Длину участка плазмы, где происходит только ускорение электронов, принято называть длиной дефазировки – l_d . Если считать, что электрон в плазменной волне движется со скоростью света, то длина дефазировки равна [5]:

$$l_d = \frac{\lambda_{pl}}{2(c - \upsilon_{ph})} c \approx \frac{\omega_0^2}{\omega_{pl}^2} \lambda_{pl}$$
(2)

где λ_{pl} – длина одного периода плазменной волны.

Таким образом, максимальное приращение энергии, которое могут набрать электроны, ускоряясь в кильватерной волне равно:

$$\Delta E = q E_l l_d \approx q E_l \frac{\omega_0^2}{\omega_{pl}^2} \lambda_{pl}$$
(3)

где q – заряд электрона, E_l – среднее значение продольного ускоряющего поля. Выражение (3) хорошо лишь для приблизительной оценки, так как в нем не учитываются нелинейные эффекты, возникающие при кильватерном ускорении, например, самофокусировка лазерного импульса. Данные эффекты приводят к изменению амплитуды ускоряющего поля и длины дефазировки.

Различные типы плазменной кильватерной волны. *Bubble*-режим ускорения

В зависимости от длительности, пространственного профиля и интенсивности лазерного импульса, а также плотности плазмы кильватерная волна может иметь различную форму. При воздействии на плазму докритической плотности коротким фемтосекундным лазерным импульсом возбуждается кильватерная волна с линейным и нелинейным профилем. При этом пространственная длина лазерного импульса $L_{\tau} = c\tau_L$ должна быть порядка, либо меньше половины плазменной длины волны $\lambda_p/2 = \pi c/\omega_{pl}$ (τ_L – длительность лазерного импульса, c – скорость света). В качестве мишени традиционно используют

плазму гелия с начальной плотностью электронов порядка 10¹⁷-10¹⁹ см⁻³. Обычно при интенсивности порядка 10^{17} – 10^{18} Вт/см² и плотности электронов меньше 10^{19} см⁻³ в плазме возбуждается линейная кильватерная волна – продольное ускоряющее электрическое поле имеет синусоидальную форму и позади лазерного импульса образуется много периодов плазменной волны с одинаковой амплитудой. При увеличении интенсивности до значения 10^{19} BT/см² и выше наблюдается переход в режим генерации нелинейной кильватерной волны. В этом случае амплитуда ускоряющего поля возрастает по сравнению с линейным режимом, приобретает пилообразный характер, но начинает быстро затухать от периода к периоду. В пределе, при достаточной величине интенсивности импульса наблюдается так называемый режим «пузыря» или bubble-режим – в плазменной волне остается только одна-две области, практически полностью лишенных фоновых электронов.

На рис. 2 показаны полученные при трехмерном численном моделировании картины плотности электронов в нелинейном режиме и в bubble-режиме.

Лазерное излучение и кильватерная волна распространяются на рис. 2 справа налево. Черным цветом обозначены области сгущения электронной плотности, белым – разрежения.

Начальная плотность электронов плазмы во всех расчетах была равна 2×10^{19} см⁻³.

На рис. 2 отчетливо видна область избыточного положительного заряда (обозначена белым цветом). Видно как в эту область у ее основания втягиваются фоновые электроны плазмы. На обоих рисунках отчетливо видны сгустки ускоряемых электронов. Численное моделирование *bubble*-режима режима ускорения было впервые выполнено в работе [6] в 2002 году. Очень скоро независимо, тремя группами ученых, данный режим был экспериментально подтвержден [7], [8], [9]. Одной из главных особенностей этого типа генерации кильватерной волны является возможность получения моноэнергетических пучков ускоренных электронов, так как все электроны ускоряются в одном периоде плазменной волны.

Постановка задачи и метод расчета

Наиболее распространенным инструментом моделирования процесса ускорения электронов в плазменной кильватерной волне служат PIC-коды (Particle-In-Cell) – математические программы, моделирующие взаимодействие лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой путем решения системы уравнений Максвелла – Власова методом «частиц-в-ячейке». Подробное описание основных положений этого метода содержится в книге [10]. В настоящей работе для численного моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов использовался разработанный во ВНИИЭФ релятивистский параллельный трехмерный PIC-код PLASMA-3P. Расчетная область, плазменная мишень и система координат, принятая при моделировании, схематически показаны на рис. 3:



Рис. 3. Расчетная область для численного моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов

В качестве мишени была выбрана плазма гелия с плотностью электронов 2×10¹⁹ см⁻³ и длиной 0,43 мм. По ширине (вдоль осей У и Z) размеры мишени были равны размерам расчетной области -0.035 мм. Расчеты проводились для трех значений интенсивности линейно поляризованного лазерного импульса – 5×10^{18} , 1×10^{19} и 2×10^{19} Вт/см², длительностью 12 фс. В зависимости от интенсивности лазерного излучения в расчетах было реализовано два режима LWFA (Laser Wakefield Acceleration): нелинейный и bubble-режим (режим «пузыря» – при интенсивности 2×10¹⁹ Вт/см²). Также для интенсивности 2×10¹⁹ Вт/см² (в режиме «пузыря») была проведена серия расчетов с различной длительностью лазерного излучения. Помимо $\tau_0 = 12$ фс, были проведены расчеты для значений $0.5\tau_0 = 6.2 \, \text{фc}$, $1,5\tau_0 = 18,6 \ \phi c$ и $2\tau_0 = 24,8 \ \phi c$. Расчетная область имела размеры: 0,47 мм вдоль оси Х и 0,035 мм по осям Y и Z. Мишень и расчетная область в двумерном случае имели те же размеры по осям Х и У, что и в трехмерном. Мишень моделировалась как двукратно ионизованная плазма гелия. Расчетная сетка в трехмерном расчете состояла из ≈1,069 миллиарда ячеек, а для моделирования плазмы использовалось ≈974,7 миллионов квазичастиц. В двумерном расчете та же задача моделировалась на сетке из 3,6 миллионов ячеек, с использованием 55,2 миллионов квазичастиц. Число точек расчетной сетки, приходящееся на плазменную длину волны, что является критерием точности расчета, в обоих случаях было одинаковым - 27 точек. Таким образом, трехмерный расчет требовал большего числа ячеек только за счет геометрии. Время одного расчета в трехмерном случае составляло 5,3 часа, в двумерном расчете – 0,6 часа.

Результаты расчетов. Сравнение энергетических спектров ускоренных электронов

По итогам численного моделирования было проведено сравнение результатов двумерных расчетов с трехмерными расчетами. В качестве основных характеристик рассматривались энергетические спектры электронов, величина продольного ускоряющего поля E_x , пространственные картины распределения электронов. Было установлено, что величины продольного ускоряющего поля E_x , формирующегося при вхождении излучения в плазму, в трехмерном и двумерном случаях совпадают. Для примера на рис. 4 приведен график зависимости ускоряющего поля E_x от координаты X для интенсивности лазерного импульса 5×10^{18} BT/см².



Рис. 4. График зависимости продольного ускоряющего поля E_x от координаты X для интенсивности лазерного импульса $5 \times 10^{18} \, \mathrm{Bt/cm^2}$

На рис. 4 показаны графики, полученные в двумерном и трехмерном расчете на один и тот же момент времени – 174 фс от начала расчета, лазерный импульс успел пройти в плазме длину \approx 40 мкм. Амплитуда поля равна 3×10⁹ В/см.

Из рис. 4 видно, что в начале расчета для двумерного и трехмерного случаев ускоряющее поле кильватерной волны полностью совпадает.

Согласно формуле (3) поле E_x является определяющей характеристикой, влияющей на процесс ускорения электронов, при неизменной плотности плазмы и интенсивности лазерного импульса. Следовательно, можно ожидать, что максимальная энергия электронов и их энергетические спектры в двумерных и трехмерных расчетах также будут совпадать, однако этого не происходит и различия весьма существенны. Расчеты показали, что несмотря на то, что в начале в плазме в двумерном и трехмерном случаях формируются идентичные профили кильватерной волны, их эволюция идет по-разному и в итоге, по прошествии 430 мкм, сгустки ускоренных электронов имеют различные энергию, заряд. Это происходит из-за того, что области разрежения и сгущения плазмы из которых состоит кильватерная волна являются существенно трехмерными структурами, двумерное описание ускорения электронов становится недостаточным. Наиболее хорошо это заметно в случае с максимальной интенсивностью - 2×10^{19} Вт/см², когда реализуется bubble-режим ускорения. На рис. 5 показаны картины плотности электронов данного режима для двумерного и трехмерного расчета в моменты времени, когда лазерный импульс прошел в плазме 60 и 380 мкм.

Из рис. 5 хорошо видно, что в обоих случаях в плазме формируется одинаковая волна.



Рис. 5. Распределения плотности электронов в плазменной кильватерной волне, полученные в двумерном (2D) и трехмерном (3D) расчётах в *bubble*-режиме (интенсивность лазерного импульса – 2×10¹⁹ Br/см²): а – момент времени, соответствующий началу расчета – лазерный импульс прошел в плазме гелия ≈60 мкм, b – момент времени, соответствующий концу расчета, лазерный импульс прошел в плазме 380 мкм (общая длина – 420 мкм)

Однако в конце расчета, в двумерном случае, пузырь имеет в 1,5 раза меньшую длину, чем в трехмерном, и его структура начинает распадаться. Также в трехмерном случае пучок электронов имеет форму «стержня», характерного для *bubble*-режима, в отличие от двумерного случая. Электроны, формирующие данный «стержень», при достаточной длине ускорения группируются, формируя моноэнергетический пучок. В двумерном расчете хорошо видны два пучка электронов – один, который ускорялся с начала инжекции электронов в пузырь и теперь находящийся в области дефазировки, и второй – в основании пузыря, только вступающий в процесс ускорения.

Наибольшие различия в спектрах ускоренных электронов наблюдаются при интенсивностях 5×10^{18} и 2×10^{19} Вт/см². Сравнения этих спектров для двумерного и трехмерного расчетов приведены, соответственно на рис. 6 и рис.7:



Рис. 6. Спектр всех электронов, ускоренных в расчете с интенсивностью лазерного импульса 5×10¹⁸ Вт/см² и вылетевших в угол 10°: 1 -- двумерный расчет (2D), 2 - трехмерный расчет (3D)



Рис. 7. Спектр всех электронов, ускоренных в расчете с интенсивностью лазерного импульса 2×10¹⁹ Вт/см² (*bubble*-режим) и вылетевших в угол 10°: 1 – двумерный расчет (2D), 2 – трехмерный расчет (3D)

Из рис. 6 и рис. 7 видно, что в случае с интенсивностью 5×10^{18} Bt/cm², в трехмерном расчете спектр электронов вытянут, с отсечкой на энергии 50 МэВ и имеет много пиков, что соответствует последовательности ускоренных пучков электронов так как в этом случае кильватерная волна имеет много периодов, ускоряющих электроны. При интенсивности 2×10^{19} BT/см², в *bubble*-режиме, спектр трехмерного расчета хорошо показывает особенности этого типа кильватерной волны - спектр имеет максимум при энергии 60 МэВ и ширину около 80 МэВ по основанию, что соответствует пучку электронов, имеющему форму «стержня», ускоряющемся в одном периоде. Двумерные спектры в обоих случаях полностью отличаются от трехмерного расчета, что показывает недостаточность двумерного описания.

Серия расчетов, в которой менялась длительность лазерного импульса, подтвердила недостаточность двумерного описания *bubble*-режима. Также она показала, что для более эффективной генерации электронов при данных плотности плазмы, интенсивности лазерного импульса целесообразно вместо принятой изначально длительности $\tau_0 = 0.5\lambda_p/c \approx 12 \, \text{фc}$, взять длительность в 1.5 раза большую $\tau = 1.5\tau_0 = 0.75\lambda_p/c \approx 18.6 \, \text{фc}$, что отображено на рис. 8:



Рис. 8. Спектры всех электронов, ускоренных в трехмерных расчетах с интенсивностью лазерного импульса 2×10^{19} Вт/см² (*bubble*-режим) и различной длительностью лазерного излучения: 1 – расчет с $\tau = 0.5 \tau_0 = 6.2$ фс, 2 – расчет с $\tau_0 = 12$ фс, 3 – расчет с $\tau = 1.5 \tau_0 = 18.6$ фс, 4 – расчет с $\tau = 2\tau_0 = 24.8$ фс

На рис. 8 показаны только спектры трехмерных расчетов, спектр 2 с «базовой» длительностью лазерного излучения $\tau_0 = 0,5\lambda_p/c\approx 12$ фс, показан также на рис. 7. Видно, что наиболее эффективно электроны в *bubble*-режиме при данных параметрах лазерного импульса, плазмы ускоряются при длительности в 1,5 раза большей $\tau = 1,5\tau_0\approx 18,6$ фс, что, по-видимому, связано с увеличением размеров «пузыря». Дальнейшее увеличение длительности импульса не приводит к последующему росту энергии электронов, что показывает спектр 4, где $\tau = 2\tau_0\approx 24,8$ фс. Соот-



Рис. 9. Распределения плотности электронов в плазменной кильватерной волне на момент вылета сгустка ускоренных электронов из плазмы, полученные трёхмерных расчётах в *bubble*-режиме (интенсивность лазерного импульса – 2×10^{19} Вт/см²) при различной длительности лазерного излучения: а – расчёт с $\tau = 0.5\tau_0 = 6.2$ фс; б – расчёт с $\tau_0 = 12$ фс; в – расчёт с $\tau = 1.5\tau_0 = 18.6$ фс; Γ – расчёт с $\tau = 24.8$ фс

ветствующие данным спектрам картины плотности электронов, показаны на рис. 9.

Видно, что уменьшение длительности импульса до $0.5\tau_0 = 0.25\lambda_p/c = 6.2$ фс приводит к уменьшению размеров ускоряющей области («пузыря»), а увеличение свыше $1.5\tau_0$ (до $2\tau_0$), заметных изменений в процесс ускорения электронов не вносит.

Заключение

При помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного полностью релятивистского кода PLASMA-3P (3D3V), основанного на методе «частиц-в-ячейке», проведено трехмерное и двумерное численное моделирование ускорения электронов в нелинейном и в *bubble*-режиме возбуждения плазменной кильватерной волны.

Цель – выяснить: существуют ли значимые отличия результатов 2D и 3D моделирования. Расчеты проводились для интенсивностей лазерного излучения 5×10^{18} , 1×10^{19} и 2×10^{19} Вт/см² и начальной плотности электронов плазмы 2×10^{19} см⁻³, длина плазмы была равна 430 мкм.

Расчеты показали, что в двумерном и трехмерном моделировании, несмотря на формирование в плазме идентичных профилей кильватерной волны в начальной стадии, в дальнейшем их эволюция идет по-разному. В итоге, через 430 мкм, сгустки ускоренных электронов имеют различные энергию, заряд. Это происходит из-за того, что области разрежения и сгущения плазмы, из которых состоит кильватерная волна, являются существенно трехмерными структурами, и двумерное описание ускорения электронов становится недостаточным. Наиболее хорошо это заметно в случае с максимальной интенсивностью $- 2 \times 10^{19}$ Вт/см², когда реализуется bubbleрежим ускорения. В этом случае в трехмерном расчете спектр электронов имеет максимум при энергии

60 МэВ и ширину около 80 МэВ по основанию, что соответствует пучку электронов, имеющему форму «стержня», ускоряющемся в одном периоде. В двумерном расчете плазменная структура «пузыря» разрушается в конце расчета, и спектры вылетевших частиц полностью отличаются от трехмерного расчета. В целом, спектры, полученные в двумерных расчетах, плохо отражают особенности соответствующих режимов генерации плазменной волны и можно сделать вывод, что двумерное описание процесса ускорения электронов в кильватерной волне является недостаточным.

Серия расчетов, в которой менялась длительность лазерного импульса, показала, что в *bubble*режиме ускорения целесообразно увеличение пространственной длины лазерного импульса, как минимум в 1,5 раза по сравнению с $\tau_0 = 0.5\lambda_p/c$, до величины $L_\tau = c\tau_L = 0.75\lambda_p$, что приводит к более эффективной генерации ускоренных электронов.

Литература

1. Костюков И. Ю., Пухов А. М. // Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы // УФН, 2015. Т. 185, № 1. С. 89–96.

2. Leemans W P et al. // Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime // Phys. Rev. Lett. 2014. **113** 245002.

3. Голубев А. И., Сысоева Т. Г., Якутов Б. П. // Генерация ионов в тонких мишенях лазерными импульсами круговой поляризации / Проблемы физики высоких плотностей энергии. Труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения // Россия, Саров, 19–23 апреля 2010 г. С. 369–374.

4. T. Tajima, J. M. Dawson. Laser Electron Accelerator // Phys. Rev. Lett. V. 43, N. 4. 1979. P. 267–270.

5. Андреев Н. Е., Горбунов Л.М. // Лазерноплазменное ускорение электронов // УФН, 1999. Т. 169, № 1. С. 53–58.

6. Pukhov A., Meyer-ter-Vehn J. // Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime // Appl. Phys. 2002. Vol. 74, P. 355.

7. Faure J., Glinec Y., Pukhov A. et. al. // A laserplasma accelerator producing monoenergetic electron beams. // Nature. 2004. Vol. 431. P. 541. 8. Geddes C. G. R. et. al. // High quality electon beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding. // Nature. 2004. Vol.431. P. 538.

9. Mangles S.P.D., Murphy C. D. // Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser plasma interactions // Nature 2004. Vol. 431. P. 535.

10. Березин Ю. А., Вшивков В. А. // Метод частиц в динамике разреженной плазмы. // Новосибирск: Наука, 1980. С. 96.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «НИМФА»

<u>А. В. Баранов</u>, О. И. Бутнев, М. Л. Сидоров, В. А. Пронин

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

Модуль расчета поверхностного стока в программном комплексе «НИМФА»

Расчетный модуль поверхностного стока в составе программного комплекса (ПК) «НИМФА» [1] разрабатывается в рамках контракта с ГК «РОСАТОМ».

На данный момент этот модуль состоит из двух частей:

• модуль расчета уравнений мелкой воды в диффузионном приближении (2D течение по поверхности);

• гидрологический модуль расчета одномерных уравнений Сен-Венана [2] для открытых водотоков (1D течение в реках).

2D модель движения воды по поверхности позволяет описывать: процесс переноса загрязнений по поверхности в результате выпадения осадков, снеготаяния, паводкового наводнения, создавать карты риска при наводнениях, определять возможные меры по предотвращению наводнений, процесс образования новых водоемов в результате запруживания рек и т. д.

При разработке гидрологического модуля перед авторами была поставлена задача выбора оптимально подходящей модели. В результате проведенного исследования выяснилось, что для моделирования требуемых процессов используют: уравнения мелкой воды (или уравнения Сен-Венана) – описывает такие явления, как образование волн, приливов и отливов и другие, кинетическое приближение уравнений мелкой воды применяется в случае, когда уклон русла каналов, стоковой поверхности постоянен, диффузионное приближение уравнений мелкой воды позволяет учитывать изменение рельефа, но при этом пренебрегает так же как и кинетическое всеми инерциальными и турбулентными членами из уравнений мелкой воды, а так же состоит всего из одного уравнения, упрощая реализацию. Поэтому для моделирования поверхностного стока в рамках ПК «НИМФА» было решено использовать именно диффузионное приближение.

Для моделирования поверхностного стока используется неявная схема, решаемая методом простой итерации.

С целью охвата класса задач, моделирующих течение по открытым каналам и рекам основываясь на опыте создания модуля поверхностного стока, было решено применить 1D диффузионное приближение уравнений мелкой воды (Сен-Венана) для каналов с прямоугольным сечением, решаемое неявной схемой. Данный элемент предназначен для описания процесса переноса загрязнений по рекам, ручьям и техногенным каналам. Такой подход в будущем позволит выполнить сопряжения 2D модели поверхностного стока и 1D модели течения в открытых каналах.

Модель поверхностного стока. Формулировка. Аппроксимация

Уравнения мелкой воды (уравнения Сен-Венана) без учета турбулентных составляющих выглядят следующим образом.

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = q \\ \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial u^2 h}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y} = \tau_x - u \frac{\eta^2 g \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - gh \frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial v^2 h}{\partial y} = \tau_y - v \frac{\eta^2 g \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - gh \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases}$$

h – глубина воды [м]; H – уровень воды (H = h + z) [м];

z – высота земной поверхности [м];

и – компонента вектора скорости по оси *ох* [м/сек];

v – компонента вектора скорости по оси *оу* [м/сек];

τ – вектор касательных напряжений [м²/сек];

g – ускорение свободного падения [м/сек²];

η – коэффициент шероховатости (Маннинга) [сек/м^{1/3}].

Уравнения мелкой воды требуют дополнительных усилий для преодоления проблемы (повторного) смачивания/осушения зон в области. Также данные уравнения чувствительны к ошибкам в цифровой модели рельефа (ЦМР).

Для описания процесса поверхностного стока в ПК НИМФА используется модель неинерциальной (диффузионной) аппроксимации уравнений мелкой воды уравнений Сен-Венана. Диффузионное приближение данной системы получается, если пренеб-

речь инерционными слагаемыми,
$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial u^2 h}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y}$$
,

 $\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial v^2 h}{\partial y}$ и вектором касательных напряже-

ний (τ_x, τ_y) . Разделим второе и третье уравнение на qh:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = q \\ u \frac{\eta^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \\ v \frac{\eta^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial H}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Данную систему можно свести к одному уравнению, для этого выразим компоненты градиента уровня во втором и третьем уравнении системы, и возведем их в квадрат

$$\begin{cases} -u \frac{\eta^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = \frac{\partial H}{\partial x} \\ -v \frac{\eta^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases} \stackrel{\mathbf{H}}{=} \begin{cases} u^2 \frac{\eta^4 \left(u^2 + v^2\right)}{h^{8/3}} = \left(\nabla_x H\right)^2 \\ v^2 \frac{\eta^4 \left(u^2 + v^2\right)}{h^{8/3}} = \left(\nabla_y H\right)^2 \end{cases}$$

Сложим два уравнения и выразим модуль вектора скорости через модуль градиента уровня

$$\frac{\eta^4 (u^2 + v^2)^2}{h^{8/3}} = (\nabla_x H)^2 + (\nabla_y H)^2$$
$$(u^2 + v^2) = \frac{h^{4/3}}{\eta^2} |\nabla H|$$
$$\sqrt{(u^2 + v^2)} = \frac{h^{2/3}}{\eta} \sqrt{|\nabla H|}$$

Подставим выражение для модуля вектора скорости во второе и третье уравнения системы:

$$\begin{cases} -u \frac{\eta}{h^{2/3}} \sqrt{|\Delta H|} = \frac{\partial H}{\partial x} \\ -v \frac{\eta}{h^{2/3}} \sqrt{|\Delta H|} = \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases}$$

Из этой системы выразим компоненты вектора скорости

$$\begin{cases} u = -\frac{h^{2/3}}{\eta\sqrt{|\Delta H|}} \frac{\partial H}{\partial x} \\ v = -\frac{h^{2/3}}{\eta\sqrt{|\Delta H|}} \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases}$$

Подставляя эти выражения в первое уравнение системы, получаем уравнение диффузионной волны:

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{5/3}}{\eta \sqrt{|\nabla H|}} \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^{5/3}}{\eta \sqrt{|\nabla H|}} \frac{\partial H}{\partial y} \right) = q$$

Последнее выражение, введя обозначение 5

$$Q = \frac{-h^3 \nabla (z+h)}{\eta \sqrt{|\nabla (z+h)|}}$$
, можно записать в компактном ви-

де следующим образом:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot Q = q$$

Уравнение решается в двумерной области *G*. Для уравнения ставятся:

начальные условия $h(x, y, t) = h^0(x, y)$,

граничные условия І-рода $h(x, y, t)|_{G2} = h^{G1}(x, y, t)$,

граничные условия II-рода
$$Q \cdot n \Big|_{G2} = \frac{h^{5/3} \frac{\partial z}{\partial n}}{\eta |\nabla z|}.$$

Для численного решения приведенных выше уравнений используется метод конечных объемов и неявная схема. Область моделирования покрывается сеткой, состоящей из многоугольных конечных объемов. Проинтегрируем полученное выше уравнение по многоугольной ячейке С с границей L (рис. 1).



Рис. 1. Ячейка интегрирования

Ниже приведем выкладки этапов интегрирования:

$$\int_{S} \frac{\partial h}{\partial t} dS + \int_{S} \nabla \cdot Q dS = \int_{S} q dS$$
$$\frac{\partial h}{\partial t} \cdot S_{C} + \int_{S} \nabla \cdot Q dS = q \cdot S_{C}$$

Применим формулу Грина и получим:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cdot S_C + \oint_L Q \cdot \overline{n} dL = q \cdot S_C \,.$$

Применив данную формулу для каждой ячейки области, получим систему нелинейных уравнений. Решение полученной системы ищется итерационно, при этом коэффициенты на гранях, являющиеся функциями водного столба, берутся с предыдущей итерации:

$$\frac{S_C}{\Delta t}h^{\gamma+1} + \sum_{i=1}^k \left[\left[-\frac{\frac{5}{h^3}}{\eta \sqrt{|\nabla(z+h)|}} \right]^{\gamma} \nabla(z+h)^{\gamma+1} \cdot \overline{N} \cdot l \right] = \frac{S_C}{\Delta t}h^n + \varepsilon$$

Обозначим реберный коэффициент $F^{\nu} = \left[-\frac{h^{\frac{5}{3}}l}{\eta\sqrt{|\nabla(z+h)|}} \right]^{\gamma}, v$ -номер итерации по нели-

нейности.

Значение $h^{5/3}$ на ребре (P2,P4) (рис. 2) берется из ячейки CL, если $(z+h)_{CR}^{\gamma} < (z+h)_{CL}^{\gamma}$, а иначе из CR (течет оттуда, где z+h больше). Модуль градиента водного горизонта также берется из ячейки против потока. Градиент высоты водного горизонта $\nabla(z+h)$ в ячейке аппроксимируется с помощью формулы Грина:

$$\nabla(z+h) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{cellFaces} \left[\left(z+h\right)_{CL}^{\gamma+1} + \left(z+h\right)_{CR}^{\gamma+1} \right] l\overline{N}}{S_{cell}}$$

Единичная нормаль \overline{N}_l к ребру l_i (P2,P4) – внешняя относительно ячейки С.

 $R_{P1, P3}$ -расстояние от центра ячейки CL до центра ячейки CR



Рис. 2. Две соседние ячейки на плоскости

Итоговое уравнение имеет вид:

$$\frac{S_C}{\Delta t}h^{\gamma+1} + \sum_{i=1}^k \left(F^{\nu} \left[\frac{h_{CR}^{\gamma+1} - h_{CL}^{\gamma+1}}{R_{P1,P3}} \right] \right)_i = \frac{S_C}{\Delta t}h^n - \sum_{i=1}^k \left(F^{\nu} \left[\frac{z_{CR} - z_{CL}}{R_{P1,P3}} \right] \right)_i + \varepsilon$$

Данное уравнение, записанное для ячейки С, наглядно демонстрирует схему заполнения строки матрицы: • Вклад от ячейки в правую часть равен $\frac{S_C}{\Delta t}h^n + \varepsilon$.

• Вклад на диагональ от нестационарного слагаемого равен $\frac{S_C}{\Delta t}$ (коэффициент перед $h^{\gamma+1}$).

• Вклад от каждого ребра ячейки на диагональ равен $\left(\left[\frac{F^{\gamma}}{R_{P_1,P_3}} \right] \right)_i$ и на внедиагональный элемент – $\left(\left[\frac{F^{\gamma}}{R_{P_1,P_3}} \right] \right)_i$.

CL и CR выстроены так, чтобы CL совпадала с рассматриваемой ячейкой.

Для улучшения сходимости итерационного процесса также вводится дополнительная поправка в диагональ матрицы и правую часть, в процессе итерационного решения поправка стремится к нулю.

Модель течений в открытых водотоках. Формулировка. Аппроксимация

Нелинейные уравнения мелкой воды в одномерном случае в переменных площадь и поток выглядят следующим образом [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \partial A \left(\frac{\partial h}{\partial s} + S_f - \frac{\partial z}{\partial s} \right) = 0 \\ S_f = \frac{Q^2 \eta^2}{A^2 R^{\frac{4}{3}}}, \quad R = \frac{A}{P} \end{cases}$$

где Q – поток вдоль русла реки (расход) [м³/сек], s – координата вдоль русла реки [м],

А – площадь смоченного поперечного сечения, перпендикулярного руслу реки [м²],

h – уровень воды в реке [м], z – отметка дна реки [м],

- Р смоченный периметр [м],
- *R* гидравлический радиус [м],
- g ускорение свободного падения [м/сек²],
- η коэффициент Маннинга [сек/м^{1/3}].

Для дальнейшего упрощения уравнения используем предположение о прямоугольной форме канала, тогда смоченную площадь и гидравлический радиус можно записать в виде:

$$A = hw, R = \frac{hw}{2h+w}, w - ширина канала
\frac{\partial wh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\frac{2}{whR^3}}{\eta \sqrt{\left|\frac{\partial(z-h)}{\partial s}\right|}} \frac{\partial(z-h)}{\partial s} \right) = q$$
Данное нелинейное параболическое уравнение есть диффузионная форма одномерных уравнений Сен-Венана для открытых каналов прямоугольной формы.

Уравнение решается численно с помощью итерационной неявной схемы:



K(i) – ребра, инцидентные узлу *i*, ΔS_i – линейный размер узла,

 ΔS – расстояние между узлом *I* и соседним узлом *J*, γ – номер итерации.

Аналитические тесты

Тест 1. Заводнение горизонтальной плоскости

Описание теста приведено в [3].

Геометрические характеристики области: длина – 5000 м, ширина – 100 м, высота – 1 м. Стресс-период: 1 час.

Начальное условие: начальный уровень воды совпадает с рельефом (h = 0, H = z(x, y) - высота рельеda).

Геодинамические свойства:

Шероховатость поверхности (коэффициент Маннинга) $\eta = 0.01 \text{ c/m}^{1/3}$.

Граничные условия: на правой, верхней и нижней границах условие: нулевой поток.

На левой границе глубина воды задана формулой (при u = 1 м/с).

$$h(0,t) = \left[\frac{7}{3}\left(0,07 + \eta^2 u^3 t\right)\right]^{\frac{3}{7}}$$

Аналитическое решение

 $h(x,t) = \left[\frac{7}{3}\left(C + \eta^2 u^3 (x - ut)\right)\right]^{\frac{3}{7}} \qquad (при \qquad u = 1 \text{ м/с}, \\ C = 0,07)$

Параметры расчета: для решения задачи использовалась треугольная неструктурированная сетка. Средний размер ребра плановой сетки составил 10 м.

Для расчета использовалась неявная противопоточная схема, шаг по времени был равен 1 секунде.

Сравнение с аналитическим решением: на рис. 3 приведен уровень воды, полученный расчетом на ПК «НИМФА», и аналитическое решение, на момент времени 1 час.



Рис. 3. Численное и аналитическое решения на момент времени *t* = 1 час

Из рис. 3 видно хорошее качественное и количественное согласие с аналитическим решением. Интегральная относительная погрешность решений составляет 1,12 %.

Tecm 2. Задача о разрыве «зеркала» воды (Flooding a disconnect water body)

Описание теста и результаты приведены в [3]. Задача описывает разрыв «зеркала» воды с течением времени.

Геометрические характеристики области: длина – 5000 м, ширина – 100 м, высота – 1м.

На рис. 4 приведено распределение высоты столба жидкости.



Рис. 4. Распределение высоты столба жидкости

Стресс-период: 20 часов.

Начальное условие: начальный уровень воды совпадает с рельефом (h = 0, H = z(x, y) - высота рельефа).

Геодинамические свойства: шероховатость поверхности (коэффициент Маннинга) $\eta = 0.03 \text{ с/m}^{1/3}$

Граничные условия: на левой границе задается уровень воды (H = h + z), зависящий от времени, в виде функции, изображенной на рис. 5.



Рис. 5. Граничное условие на левой границе

На правой, верхней и нижней границах задано условие не протекания.

Параметры расчета: для решения задачи использовалась структурированная сетка. Средний размер ребра плановой сетки составил 10 м.

Контрольные точки ставились в координатах (x, y) = [(400 м, 50 м), (600 м, 50 м)].

Для расчета использовалась неявная протипоточная схема, шаг по времени 60 сек.

Сравнение с результатами, полученными на зарубежных программных средствах (ΠC): сравнение результатов расчетов уровня воды в контрольных точках (400 м, 50 м) и (600 м, 50 м), полученных расчетом на ПК «НИМФА», и на различных зарубежных ПС [4] приведено на рис. 6, 7.



Рис. 6. Распределение уровня воды по времени в контрольной точке (400 м, 50 м)



Рис. 7. Распределение уровня воды по времени в контрольной точке (600 м, 50 м)

Из рис. 6, 7 видно хорошее качественное и количественное согласие с данными по расчету поверхностного стока, полученными на зарубежных ПС.

Различие на начальный момент времени по уровню воды связано с различной точностью установки контрольных точек и сбора данных в них.

Литература

1. Бутнев О. И., Горев И. В., Дерюгин Ю. Н., Колесников С. С., Машенькин П.А., Пронин В. А., Сидоров М. Л., Журавлева М. В., Лысова Е. Н. Комплекс программ НИМФА. Методика решения нелинейной однофазной фильтрации жидкости и тепломассопереноса в пористых средах // Сборник материалов XVI сессии молодежной школы-семинара «Промышленная безопасность и экология». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2017. С. 202–209.

2. De Saint Venant B. Theorie du movement nonpermanent des eaux, avec application aux crues des rivieres et a l'introduction des marees dans leur lits. Comptes rendus des séances de l'Academie des Sciences 1871; 73: 148-54, 237-40.

3. Leandro, J., Chen, A.S., Schumann, A., A 2D Parallel Diffusive Wave Model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave), Journal of Hydrology, 2014.

4. S. Néelz, G Pender, Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages, Environment Agency, June 2010.

РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ЛОГОС»

О. А. Баулин, К. Н. Шавлач, И. А. Хайруллина

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

На этапе эскизного проектирования разработка образцов ракетно-космической техники (РКТ) всегда сопряжена с расчетным обоснованием принятых конструкторских решений. В дальнейшем на этапе опытно-конструкторских работ, проверка этих решений осуществляется путем наземной отработки различных вариантов исполнения изделий, в рамках которой насчитываются сотни видов испытаний отлельных составляющих и изделий в целом на воздействие различных физических факторов. Однако практически все виды испытаний также требуют предварительных расчетных оценок ожидаемых параметров физических величин. Таким образом, процесс проектирования изделий включает обширную расчетную проработку функционирования изделия в условиях штатного применения и ещё более подробную проработку в обеспечение проведения различных видов испытаний из числа наземной отработки.

Эффективность наземной отработки во многом зависит от качества предварительной расчетнометодической подготовки. Причем с увеличением сложности физических процессов, моделируемых в опыте, многократно возрастает сложность их численного моделирования.

Численное моделирование сложных физических процессов требует значительной развитости функционала программного комплекса (ПК) и мощных вычислительных ресурсов. Перспективным программным комплексом, активно внедряемым в настоящее время в расчетную практику, является программный комплекс разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ ЛОГОС.

В статье представлен обзор задач из числа наземной отработки образцов РКТ и примеры их решения с использованием данного ПК, выполненные в 2017–2018 гг. Во всех задачах твердотельные модели импортируются из конструкторских пакетов, построение расчетной сетки и задание параметров задачи – в ЛОГОС-Препост, обработка результатов – в ScientificView. Расчеты проведены на персональных ЭВМ, что в некоторых случаях накладывало ограничения на постановку задачи.

Расчет АДХ объекта испытаний сложной аэродинамической компоновки в условиях проведения испытаний на РКУ

В обеспечение испытаний парашютной системы на ракетно-катапультирующей установке (РКУ) проведен расчет обтекания ракетной тележки [1].

Особенностью расчета стала сложная геометрия объекта испытаний с отделяющимися в процессе движения по РКУ конструктивными элементами (крышка парашютного отсека отстреливается и движется в следе за ракетной тележкой) и аэродинамическая интерференция с конструкцией РКУ. Расчетная модель приведена на рис. 1.



Рис. 1. Расчетная модель

Расчеты проведены в диапазоне от дозвуковых до сверхзвуковых скоростей обтекания. Для различных условий обтекания построены свои расчетные сетки с использованием метода отсечения. Проведение расчетов удалось осуществить только с использованием модели невязкого газа.

В качестве результатов расчетов представлены расчетная сетка и распределение газодинамических параметров в расчетной области для скорости $V_{\infty} = 400$ м/с.

ScientificView позволяет выводить параметры газа в любой требуемой ячейке, что позволяет, в частности, убедиться в формировании невозмущенного течения с заданными параметрами перед ударной волной (см. рис. 2).



Рис. 2. Расчетная сетка и поле числа Маха (V_{∞} = 400 м/с)



Рис. 3. Поле давления

На рис. 3 приведено поле давления в плоскости симметрии задачи с отходом крышки парашютного контейнера.

Из анализа результатов расчета следует, что в целом они соответствуют физике процесса. Однако задача требует глубокой детальной проработки (использование вязкой модели течения, различных моделей турбулентности, более подробной расчетной сетки и т.д.) и верификации на экспериментальных данных.

Расчет параметров головной ударной волны большом расстоянии от обтекаемого объекта

Расчет параметров головной ударной волны (УВ), возникающей при обтекании гиперзвуковых ЛА, является актуальной задачей. В частности большой интерес вызывает расчет распространения УВ на большие расстояния от траектории полета ЛА. Такие данные могут получить широкое практическое применение: определение безопасных зон при проведении испытаний с гиперзвуковыми ЛА, определение скорости и мест их падения и т. д. и т. п.

Основная сложность задачи заключается в её разномасштабности: размеры объекта возмущений, определяющего форму и интенсивность УВ, на порядки меньше расстояний, на которых необходимо определить её параметры.

В классических задачах аэродинамики расчетная сетка сгущается в окрестности обтекаемого объекта. В данном же случае для достаточного разрешения УВ на больших расстояниях необходима подробная сетка в расчетной области значительно превышающей характерные размеры объекта возмущений. Это приводит к тому, что с увеличением расстояния до обтекаемого объекта лавинообразно возрастает потребное число ячеек расчетной сетки, что приводит к невозможности проведения расчета не только на ПЭВМ, но и, в отдельных случаях, на Супер-ЭВМ. Для преодоления этой проблемы предложены следующие принципы:

 глубокая оптимизация формы и размеров расчетной области

2) местное сгущение расчетной сетки в области прохождения УВ

В качестве обтекаемого объекта выбран сферически затупленный конус.

Принимая во внимание то, что при свехзвуковом обтекании возмущения не распространяются вверх по потоку, внешняя граница расчетной области выбрана так, что практически повторяет изгиб УВ. Форма УВ определялась в предварительных расче-



Рис. 4. Расчетная сетка



Рис. 5. Распределение давления в расчетной области

тах, проводимых на грубых сетках. Вместо полноценной расчетной области выбран сектор с углом раствора 30°. На плоских гранях сектора заданы условия симметрии. Таким образом, решается задача *трехмерного* обтекания. При этом габариты расчетной области минимизированы.

В расчетной сетке реализована «полоса замельчения», в которую попадает фронт УВ. Таким образом, расчетная область включает две локальных зоны с подробной сеткой: вокруг обтекаемого объекта и в узкой окрестности УВ. Остальные ячейки расчетной сетки не оказывают значительного влияния на результат расчета параметров УВ и выполнены значительно более крупными.

Таким образом, построенная расчетная сетка (см. рис. 4) характеризуется наиболее оптимальным распределением ячеек для решения поставленной задачи.

Расчет обтекания проведен со следующими параметрами: скоростью набегающего потока V_{∞} = 4130 м/с, высота – 0 м, условия – нормальные. При данных условиях реализуются экстремальные значения температур и давления торможения в носке конуса.

Распределение давления в расчетной области представлено на рис. 5.

Изменение давления при переходе через фронт УВ в зависимости от расстояния до оси обтекаемого тела приведено на рис. 6.



Рис. 6. Изменение давления при переходе через фронт УВ

Таким образом, ПК ЛОГОС обладает развитым функционалом, позволяющим строить расчетные сетки максимально адаптированные под условия задачи. При этом решатель позволяет проводить расчет обтекания в условиях экстремальных температур и давлений.

В дальнейшем планируется развитие данной задачи с увеличением расчетной области до размеров, при которых УВ вырождается в акустическую, а также, верификация результатов расчетов на экспериментальных данных.



Рис. 7. Расчетная модель



Рис. 8. Расчетная сетка (продольный разрез)

Расчет АДХ объекта испытаний, разделяющегося в процессе движения

В обеспечение испытаний макета изделия на РКУ проведен расчет обтекания ракетного поезда (РП) в условиях движении вдоль рельсовых направляющих.

Особенность задачи заключается в сложной геометрии обтекаемого объекта, его разделении (отстыковка изделия от РП) в процессе движения по рельсовым направляющим и аэродинамической интерференции с конструкцией РКУ.

Расчетная модель приведена на рис. 7.

Полноценное решение данной задачи необходимо проводить в прямой постановке с использованием динамически перестраиваемых расчетных сеток. На момент проведения расчетов данная технология ещё не была отработана, к тому же, с учетом того что длина участка движения РП составляет более 2 км, подобная технология представляется чрезвычайно ресурсоемкой. Как альтернативный вариант, расчет проведен в следующей постановке: на участке движения выбираются несколько положений с фиксированными расстоянием между РП и ОИ, скоростями движения и т. д., при которых проводится стационарный расчет обтекания. Пример расчетной сетки для одного из таких положений приведен на рис. 8.

Провести расчет с использованием модели реального воздуха не удалось (решение не сходится). В результате расчет проведен с использованием модели идеального газа. Результаты решения представлены на рис. 9. Из результатов расчета следует, что ПК ЛОГОС обладает развитым функционалом, позволяющим строить расчетные сетки максимально адаптированные под условия задачи.

Решение задачи требует глубокой детальной проработки и верификации на экспериментальных данных.

В дальнейшем планируется решение данной задачи с использованием динамически перестраиваемых расчетных сеток типа «Химера».

Расчет параметров тепломеханического стенда

Использование установок, работающих на принципе сжигания кислородо-водородной смеси, для моделирования аэротермомеханического нагружения макетов ЛА широко распространено. Как и любые другие виды испытаний испытания на таких установках требуют предварительных расчетных оценок ожидаемых параметров. С использованием ПК ЛОГОС проведены расчеты смешения и горения кислородо-водородной смеси в двух различных типах камер сгорания (КС), основным отличием которых является схема подвода рабочих газов (радиальная и тангенциальная).

Расчет горения в КС с радиальной схемой подвода рабочих газов

Схема КС приведена на рис. 10.



Рис. 9. Поле давления: а – а = –1,02°, Δx = 2,295 м, Δy = 0,443; б – а = –1,65°, Δx = 3,060 м, Δy = 0,394; в – а = –2,34°, Δx = 3,825 м, Δy = 0,340



Рис. 10. Схема КС (продольный разрез)

Проведение расчета требует расчетной области с дополнительным объемом, в который происходит истечение продуктов сгорания из КС. С учетом этого, построена расчетная сетка, представленная на рис. 11.



Рис. 11. Расчётная сетка

В расчете за основу принята простая реакция горения водорода в кислороде:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$$

Граничные условия, заданные в расчете, приведены на рис. 12.



Рис. 12. Граничные условия

Результаты расчета представлены в виде полей газодинамических параметров в продольном сечении КС на рис. 13.

Расчет горения в КС с тангенциальным подводом рабочих газов

Расчет проведен в связанной (газодинамикатеплопередача) нестационарной постановке. Схема КС и построенные расчетные сетки приведены на рис. 14–16.



Рис. 13. Поля давления, температуры и числа Маха





Рис. 16. Расчётная сетка для задачи теплопередачи

Результаты расчета приведены в виде изоповерхностей концентраций кислорода и водорода, а также полей температуры по толщине конструкции КС в различные моменты времени после запуска установки (см. рис. 17–19).



Рис. 17. Поле концентрации кислорода







Рис. 19. Прогрев КС

Выводы

Все используемые в настоящее время программные комплексы имеют свои ограничения. Например, возможность проводить расчеты только для простых осесимметричных тел (большинство традиционно используемых программ) или возможность использования только тэтраэдральных расчетных сеток с кубической расчетной областью (EFD.lab) и т. д. Кроме того, существуют ограничения связанные с использованием импортных пакетов. В этих условиях ПК ЛОГОС занимает свою нишу в расчетной практике проектных работ, во многом благодаря своей универсальности.

По результатам проведенных расчетов выявлено, что ПК ЛОГОС имеет развитый функционал, позволяющий моделировать в трехмерной постановке газодинамические и связанные процессы в широком диапазоне скоростей, при экстремальных значениях газодинамических параметров и с использованием практически любых геометрических моделей. Кроме того, следует отметить, что хорошо отлажен алгоритм распараллеливания решения, что в случае использования многопроцессорной ЭВМ позволяет успешно проводить ресурсоемкие расчеты.

При решении всех рассмотренных задач серьёзных замечаний к построителю расчетных сеток ЛОГОС-Препост и визуализатору решения ScientificView не возникло, что нельзя сказать о решателе. В большинстве случаев для проведения расчета приходилось значительно упрощать расчетную схему, в частности, вместо модели реального воздуха использовать модель идеального газа. Эти обстоятельства, несомненно, требуют дальнейшей доработки ПК и его верификации на экспериментальных данных.

Литература

1. п. RU № 2654885, МПКG01 В 7/00, приоритет от 03.04.2017. Способ испытаний парашютных систем и стенд для его осуществления.

МОДУЛЬ НАСЫЩЕННО-НЕНАСЫЩЕННОЙ И НАПОРНО-БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ «НИМФА»

<u>А. Н. Бахаев,</u> В. В. Горев, М. Л. Сидоров, П. А. Машенькин

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

Программный комплекс «НИМФА» (ПК «Нимфа») [1] создан в ходе реализации проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», выполненного в рамках Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России в 2010–2012 годах.

ПК «НИМФА» разрабатывается в РФЯЦ-ВНИИЭФ для моделирования многокомпонентной многофазной фильтрации и переноса примесей подземными водами в подземном пространстве со сложной геологической структурой. Программа ориентирована на решение задач с помощью полномасштабного комплексного моделирования на современных высокопараллельных супер-ЭВМ (десятки тысяч процессоров).

В ПК «НИМФА» моделируются следующие процессы: однофазная, двухфазная и трехфазная фильтрация; анизотропная среда, модель трещиновато-пористой среды; конвективный перенос потоком многокомпонентной примеси; гидродинамическая дисперсия, адсорбция, химическая кинетика; плотностная и тепловая конвекция; модель поверхностного стока, неньютоновские течения, модель эвапотранспирации.

С 2014 года ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с ФГБУ «Гидроспецгеология» по инициативе ГК «Росатом» реализует программу доработки и внедрения импортозамещающего инновационного программного продукта «НИМФА» в практику геоэкологических расчетов на объектах «Росатома» в качестве отраслевого стандартного программного продукта.

15 июня 2017 г. экспертный совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре (НТЦ ЯРБ) утвердил аттестационный паспорт ПК «НИМФА». Таким образом, ПК «НИМФА» стал первым в стране аттестованным программным продуктом для моделирования территорий размещения ядерных радиационно-опасных объектов (ЯРОО) ГК «Росатом». Ранее для этих целей использовались импортные программные продукты.

25 мая 2017 г. подписан договор № 12463-Д с ГК «Росатом». В рамках договора по ПК «НИМФА» впервые проведены расчеты гидрологической модели участка «Водоем-9» ФГУП «ПО «Маяк». Разработаны алгоритмы и программы для гидрологического модуля (паводки, поверхностный сток, сток по реке), а также модели насыщенноненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации. Комплексная модель такой сложности создана впервые в стране.

Обеспечение высокой достоверности прогнозов распространения радионуклидов в грунтах и грунтовых водах при обосновании безопасности ЯРОО и вывода из эксплуатации пунктов хранения ядерных материалов и хранилищ радиоактивных отходов.

Внедрение ПК «НИМФА» на экологически значимых объектах ГК «Росатом», оказывающих масштабное влияние на окружающую среду (4 объекта), включающее передачу ПК и разработанных геофильтрационных и геомиграционных моделей на предприятия и проведение обучающих семинаров для пользователей.

За последние десятилетия в связи с интенсивным воздействием человека на гидросферу произошло существенное нарушение естественного гидродинамического и гидротехнического режимов подземных вод – одного из важнейших компонентов окружающей среды.

В связи с этим возникала необходимость при выполнении различных мероприятий оценивать последствия такого воздействия. Мелиорация, добыча полезных ископаемых, откачка воды из водоносных горизонтов, создание новых плотин на реках, изменение уровня воды в существующих водохранилищах и целый ряд других факторов приводит к масштабному изменению состояния почвы и подземных вод. Необходимость моделирования процессов ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации часто возникает при решении геоэкологических задач, в частности, при обосновании безопасности приповерхностных захоронений радиоактивных отходов или оценке влияния различных объектов ядерного наследия на качество подземных вод. При этом натурные наблюдения и целенаправленные эксперименты, выполняемые для оценки антропогенного влияния, оказываются весьма дорогостоящими и трудновыполнимыми. Поэтому актуальным становится использование численных расчетов и теоретических подходов с применением математических моделей рассматриваемых процессов.

В ПК «НИМФА» для расчета гидродинамики подземных вод была реализована модель напорной фильтрации (все поры породы заполнены водой). Однако на практике большой класс течений подземных вод плохо описывается моделью напорной фильтрации (образование депрессионных воронок вблизи карьеров и откачивающих скважин, сезонные изменения уровня грунтовых вод и т. д.). Для расчета таких течений используются две модели: насыщенно-ненасыщенная фильтрация, напорно-безнапорная фильтрация.

Модель насыщенно-ненасыщенной фильтрации используют, когда включают зону, в которой часть пор заполнена водой, а часть воздухом.

Модель напорно-безнапорной фильтрации представляет собой упрощение модели насыщенноненасыщенной фильтрации (зоны с водой и воздухом нет, а между сухой и мокрой зоной существует четкая граница).

Для реализации этих моделей в ПК «НИМФА» были разработаны численные методы, проведена модификация препроцессора. Внедрение этих моделей в ПК «НИМФА» существенно расширяет класс решаемых задач по этому пакету.

Основные иностранные программные продукты, которые получили признание гидрогеологов:

- VS2D [2] (Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's computer program VS2D);

- HYDRUS [3] (The HYDRUS Code for Simulating the One- and Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media);

- FEFLOW [4] (Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media);

- MODFLOW [5] (Variably Saturated Flow VSF Process for MODFLOW);

- SUTRA [6] (A Model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport).

При разработке расчетного кода этапом, предваряющим применение кода на практике, является верификация численной модели. Верификация заключается в сравнении с известными референтными решениями (аналитическими, численными или полученными экспериментальным путем).

Математическая модель насыщенноненасыщенной фильтрации жидкости в пористой среде является упрощением двухфазной модели фильтрации [7] (при определенных допущениях). Вводится в рассмотрение система уравнений, описывающих двухфазную изотермическую фильтрацию в пористом пласте, примененную к характерному объему.

Система уравнений, описывающая процесс двух фазной изотермической фильтрации базируется на законе сохранения массы веществ и обобщенном законе Дарси, который устанавливает зависимость между скоростью фильтрации фаз и градиентами давления в фазах. То есть, система уравнений содержит два уравнения баланса массы, записанной для каждой из фаз – воды и воздуха, два уравнения, выражающих закон Дарси и соотношение, связывающее насыщенности фаз. При определенных допущениях [7], данную систему можно серьезно упростить. При температуре около 20 градусов Цельсия вязкость воздуха в 55 раз меньше вязкости воды. Из этого факта следует, что подвижность воздуха намного больше подвижности воды, если относительные проницаемости флюидов одинаковы. Таким образом, предполагается, что изменение давления в воздушной фазе уравновешивается намного быстрее, чем в водной фазе. С другой стороны можно предположить, что воздушная фаза непрерывна в поровом пространстве и связана с атмосферой. Изза отмеченных сверху свойств можно полагать, что давление в воздушной фазе равно атмосферному давлению. Это предположение исключает уравнение для воздушной фазы из системы уравнений, описывающую двухфазную фильтрацию. Отметим так же, что капиллярное давление определяется однозначно с помощью давления воды. Для удобства полагается, что атмосферное давление равно нулю.

Соответственно, насыщенность воды и относительная проницаемость воды могут быть определены как функции, зависящие от давления воды. Если давление воды меньше нуля, то насыщенность и проницаемость вычисляются с помощью аналитических моделей. Таким образом, вместо системы уравнений, имеем одно уравнение, записанное относительно давления воды. То есть, математическая формулировка задачи основывается на уравнении Ричардса [7], которое дополняется зависимостями влагосодержания и относительной проницаемости от высоты всасывания.

Иными словами, математическая модель изотермической фильтрации жидкости в насыщенноненасыщенных пористых средах формулируется в терминах высоты всасывания и влагосодержания. Они определяются из дифференциального уравнения Ричардса, который выражает закон сохранения массы и закон Дарси. Для численного решения уравнения Ричардса необходимы замыкающие соотношения, для этого используют алгебраические уравнения связи высоты всасывания с влагосодержанием, называемые капиллярными соотношениями. Так же необходимы соотношения, связывающие тензор фильтрации и высоту всасывания.

Модель напорно-безнапорной фильтрации является упрощенной версией модели насыщенноненасыщенной фильтрации. Для её задания требуется меньше исходных данных в отличие от модели насыщенно-ненасыщенной фильтрации, однако, решаемые уравнения те же самые. Отличие состоит в виде алгебраических функций связи влагосодержания от высоты всасывания и тензора фильтрации от высоты всасывания. Вводится в рассмотрение термин псевдонасыщенность, смысл которого связан непосредственно с актуальными геометрическими условиями в ячейке. Возможны три случая наполнения ячейки:

ячейка полностью насыщенна;

- ячейка частично насыщенна;

– ячейка полностью ненасыщенная (сухая).

Предположения, касающиеся коэффициента фильтрации:

 в ненасыщенной зоне коэффициент фильтрации является малой величиной по отношению к насыщенной зоне (степень малости задается пользователем);

 – для заданной ячейки коэффициент фильтрации меняется линейно от минимального значения (влагосодержание близко к нулю) до максимального (полное заполнение водой ячейки) по мере роста уровня грунтовых вод.

Одномерная нестационарная ненасыщенная фильтрация в вертикальном столбе сухого грунта (Celia et al.'s problem)

Рассматривается стандартный одномерный тест, предложенный Celia M.A [8], который предназначен для тестирования задач ненасыщенной фильтрации. Исследуется одномерная фильтрация воды в вертикальном столбе сухого грунта высотой 1 м. Расчетное время задачи составляет 1 сутки. Относительная погрешность (зависимость высоты всасывания от высоты столба) между численными решениями FEFLOW и ПК «НИМФА» составила не более 0,27 %.

Задача о верховодном уровне грунтовых вод (Perched water table problem)

Приводится двумерная задача, предложенная Kirkland [9], связанная с развивающимся верховодным уровнем грунтовых вод в ненасыщенном (сухом) пористом пласте. Эта тестовая задача, необходима, чтобы показать работоспособность модели в насыщенной и ненасыщенных зонах. Расчетное время 1 сутки. Временной шаг равнялся 0,01 суток. В расчете использовалась регулярная сетка с шагом 5 см. Максимальный дисбаланс по ячейкам не превысил 0,001 [кг/сутки].

Инфильтрация в большом кессоне (Infiltration in a large caisson)

Данный тест [4] используется для верификации программы FEFLOW. Исследуется инфильтрационный процесс в большом кессоне, который заполнен однородным материалом и в котором начальные условия соответствуют сухому грунту. Все границы кессона непроницаемы, за исключением зоны инфильтрации сверху. Задано начальное поле высоты всасывания. Расчетное время задачи 30 суток. Относительная погрешность (изолинии насыщенности) между численными решениями FEFLOW и ПК «НИМФА» составляет не более 2,7 %.

Задача о капиллярном барьере (Capillary barrier modeling)

Капиллярные барьеры образуются в ненасыщенных условиях, когда слой мелкозернистых пород лежит на слое крупнозернистых отложений. Барьер возникает из-за разной проницаемости мелкозернистых и крупнозернистых пород в ненасыщенных условиях. При одних и тех же значениям высоты всасывания, близкого к условиям полного насыщения, коэффициент фильтрации песков и гравия отличается на 4 порядка. Однако, в гравии коэффициент фильтрации в ненасыщенных условиях меньше. Это всё дает основание, чтобы использовать механизм капиллярных барьеров для изоляции отходов.

В расчетной области присутствуют два наклонных пласта мощностью 0,5 м каждый. Верхний пласт состоит из мелкозернистых песков, а нижний – из крупнозернистых песков. Угол наклона капиллярного барьера составляет 5 %. На верхней границе задано инфильтрационное питание 0,0048 м/сут. Граница слева – непроницаемая. Данная задача позволяет протестировать следующие вопросы:

 – орошение сильно осушенных грунтов, что обычно вызывает большие трудности с вычислительной точки зрения;

 сильная неоднородность гидравлических параметров пластов;

 – образование насыщенной зоны внутри расчетной области

Аналитическим решением для данной задачи является формула Росса [4], которая дает выражение расстояния отклонения потока капиллярным барьером. Иными словами это означает, что с ростом абсциссы в некоторый момент начинается просачивание жидкости через барьер, которое в некоторой точке сравнивается с инфильтрационным потоком. Абсцисса этой точки называется расстоянием отклонения потока капиллярным барьером. Для данного теста эта абсцисса рассчитана в [4] и составляет 32,6 м.

По результатам моделирования можно констатировать качественное соответствие результатов аналитическому значению расстояния отклонения и количественное – результатам, полученным с помощью программ FEFLOW и HYDRUS. Причем, в сравнении с кодом FEFLOW решение по программе НИМФА проявляет монотонный характер, в то время как в решении FEFLOW наблюдаются осцилляции.

Задача Баренблатта о растекании бугра жидкости в безнапорном сухом пласте [10]

Одним из примеров задач гидравлической безнапорной фильтрации является формирование водонасыщенной зоны в безнапорном сухом пласте при растекании бугра подземных вод. Рассматривается одномерное движение подземных вод в области фильтрации, лежащей на горизонтальном непроницаемом водоупоре. Данная задача была предложена и решена Баренблаттом [10].

Тест о растекании бугра позволит:

 проверить способность численной модели рассчитывать движение фронта насыщенной зоны и распределение напоров в области фильтрации;

 – оценить симметричность решения относительно нулевой линии абсцисс;

– оценить сходимость численных расчетов к аналитическому решению.

В работе [10] описано, что данный тест относится к одной из наиболее тяжелых проблем, характерных для задач однофазной фильтрации в безнапорном режиме, связанной с изменением во времени границ области, в которой происходит движение подземных вод, описываемое уравнением Бусинеска.

Численные результаты, полученные с помощью ПК «НИМФА» демонстрируют устойчивую работу нелинейных алгоритмов, используемых в напорнобезнапорной модели, полученные результаты совпадают с аналитическим решением, наблюдается сходимость к аналитическому решению.

Задача Полубариновой-Кочиной о безнапорной фильтрации через тело дамбы [11]

Данная задача относится к классу гидродинамических задач и хорошо изучена отечественными гидродинамиками. При решении данной задачи в программе НИМФА необходимо определить:

- расход в нижнем бьефе;
- положение свободной поверхности;
- размер участка высачивания.

Коэффициент фильтрации грунта тела перемычки равен 0,864 м/сут. Расход в нижнем бьефе и величину участка высачивания необходимо сравнить с аналитическими оценками.

Данная задача является стационарной, в ПК «НИМФА» она рассчитывалась методом установления. Максимальная погрешность (на самой грубой сетке 10*10) по расходу жидкости через перемычку составляет 0,88 %, а на сетке 40*40 погрешность составляет 0,33 %. Из полученных результатов следует, что более подробная дискретизация сетки дает лучшую сходимость численных и аналитических расчетов. Высота высачивания по ПК «НИМФА» на сетке 40*40 составила порядка 2,25 м, что выше оценки по номограммам, составляющей 2 м, на 12,5 %.

Двумерная насыщенно-ненасыщенная фильтрация и адвективно-дисперсионный перенос в неоднородной зоне аэрации с учетом радиоактивного распада [2]

Данная задача используется в качестве обучающей для программы VS2D. Расчетная область имеет следующие геометрические размеры: 6,47 метров ширина области и 4,06 метров высота области. Зона аэрации неоднородна, она состоит из двух типов грунтов – хорошо проницаемых песков и менее проницаемых пылеватых грунтов. В задаче используется модель Genuchten – Mualem [4].

До глубины 4.5 метра задано нулевые значения пьезометрической высоты, что соответствует уровню грунтовых вод, а выше этой отметки задано гидростатическое распределение. На верхней границе задано инфильтрационное питание 0,01 [м/сут]. Хранилище отходов моделируется в углублении, в котором задана концентрация инфильтрата 1000 [мг/л]. На нижних участках левой и правой границы задано граничное условие первого рода, напор равен – 4,5 метра. Расчетное время задачи составляет 110 суток. Полученные результаты фильтрационной задачи с помощью ПК «НИМФА» и программы VS2D близки. Результаты моделирования по миграции также близки между собой.

Верификация ПК «НИМФА» в части насыщенной-ненасыщенной фильтрации на геофильтрационной модели объектов ИХЗ ФГУП «ГХК»

Данная задача была поставлена и решена в рамках договора между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ГХК». В рамках данных работ проводилось создание средствами ПК «НИМФА» геофильтрационной и геомиграционной модели объектов изотопно-химического завода федерального государственного бюджетного учреждения «Горнохимический комбинат».

В данной задаче стресс-период для расчета фильтрации составляет 73000 суток, по достижении которого устанавливается стационарное распределение давлений, напоров, влагонасыщенности. Стресспериод для расчета миграции составляет 11688 суток. В задаче используется модель van Genuchten-Mualem.

Максимальная относительная разность решений, полученных с помощью ПК «НИМФА» и VS2D, по высоте всасывания и влагосодержании не превысила 1,9 %, а по концентрации не превысила 3,11 %.

Литература

1. «Программный комплекс НИМФА для решения геофильтрационных и геомиграционных задач» Отчёт о НИР/ВНИИЭФ, О. И. Бутнев, В. В. Горев, И. В. Горев, Пронин В. А., Сидоров М. Л., Машенькин П. А., и др. инв. № 8/26530 нс, Саров, 2016.

2. Healy, R.W., Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's computer program VS2D: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4025, 125 p., 1990.

3. Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The Hydrus-1D Software Pack-

age for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 315, 2008.

4. Diersch H. J. G. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer. 2014.

5. McDonald, M. C. and A. W. Harbaugh. MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, 1988.

6. Voss C. I., Provost A.M., Sutra, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute of energy transport; U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369, USA, 2010.

7. Szymkiewics A. Modeling water flow in unsaturated porous media. Springer. 2013.

8. Celia M.A., Bouloutas E.J, ZabraR.L. A General mass conservative numerical solution for unsaturated flow equation. Water Resources Research. 1990, 26(7), 1483-96.

9. Kirkland M. R., Hills R. G., Wierenga P. J. Algorithms for solving Richard's equation for variably saturated soils. Water Resour. Res., 1992, 28(8) 2049-2058.

10. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: "Недра", 1972.

11. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М. Наука. 1977, С. 664.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В МНОГОПОТОКОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ В ПК «ЛОГОС»

<u>О. Г. Близнюк</u>, А. В. Гичук, О. Е. Власова, И. В. Лялюшкина, И. А. Низамова

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

Физические процессы, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния вещества, являются базовым принципом функционирования многих промышленных установок и бытовых приборов, поэтому актуальность моделирования многофазных течений в ПК «ЛОГОС» не вызывает сомнений.

В данной работе описана модель многофазного течения в многопотоковом приближении [1,2], которую в литературе обычно называют эйлеровой моделью. Каждая фаза описывается своей системой уравнений – неразрывности, движения и энергии, – причем в общем случае эти системы зависимы из-за межфазных обменов массой, импульсом, энергией и уравнений состояния.

В докладе также приведены постановки тестовых задач и результаты численных исследований. Рассмотрены решения задач об ускорении капель воды воздушным потоком, о разделении фаз в поле силы тяжести и о пропускании газа через слой жидкости.

Система уравнений модели

Рассмотрим *n*-фазное течение. Для каждой фазы записывается система уравнений Навье-Стокса, а также уравнение энергии. В правых частях этих уравнений учитываются межфазные обмены массой, импульсом и энергией.

Уравнения неразрывности для данного течения имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \operatorname{div} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) + S_q \quad (1)$$

Здесь

t – время (с); α_q – объемная концентрация фазы q,

$$\sum_{p=1}^{n} \alpha_p = 1$$
 (безразмерная величина);

 ρ_q – плотность фазы q (кг/м³);

 $\mathbf{v}_q = (v_{q1}, v_{q2}, v_{q3}) = (u_q, v_q, w_q)$ – скорость фазы q (м/с);

 m_{pq} – удельная интенсивность массообмена от фазы *p* к фазе q (кг/(м³×c));

 S_q – источниковый член (кг/(м³×с)).

Уравнения движения для n-фазного течения запишутся как:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) + \alpha_q \nabla P =$$

$$= \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{\tau}_q) + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + m_{pq} \mathbf{v}_{pq} - m_{qp} \mathbf{v}_{qp}) + F$$
⁽²⁾

Здесь

P – давление (Па); τ_q – тензор напряжений для фазы q;

 $g = (g_1, g_2, g_3)$ – ускорение свободного падения (м/c²);

 \mathbf{R}_{pq} – объемная сила межфазного трения (H/м³);

F – дополнительные межфазные силы; \mathbf{v}_{pq} и \mathbf{v}_{qp} таковы, что

$$\mathbf{v}_{pq} = \begin{cases} \mathbf{v}_p, & m_{pq} \ge 0, \\ \mathbf{v}_q, & m_{pq} < 0, \end{cases} \quad \mathbf{u} \quad \mathbf{v}_{qp} = \begin{cases} \mathbf{v}_q, & m_{qp} \ge 0, \\ \mathbf{v}_p, & m_{qp} < 0. \end{cases}$$

И, наконец, уравнения энергии для многофазного течения записываются в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \operatorname{div} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q h_q) - \alpha_q \frac{dP}{dt} = \nabla \cdot (\alpha_q \lambda_q \nabla T_q) + \alpha_q \mathbf{\tau}_q : \nabla \mathbf{v}_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + m_{pq} h_{pq} - m_{qp} h_{qp})$$
(3)

Здесь

_{*h_a*} – удельная энтальпия фазы q (Дж/кг);

 λ_q – коэффициент теплопроводности фазы q (Вт/(м·К));

 T_q – температура фазы q (К);

 Q_{pq} – объемная мощность теплопереноса из фазы *p* в фазу q (Вт/м³);

 h_{pq}, h_{qp} – энтальпия межфазной поверхности (Дж/кг).

Для замыкания записанной системы уравнений (1)–(3) требуется описать все межфазные взаимодействия (массообмен, теплообмен, межфазное трение) в терминах переменных, присутствующих в этих уравнениях, а также определить зависимость плотностей, энтальпий и их производных от температур и давления:

$$\rho_{q} = \rho_{q} \left(P, T_{q} \right), \lim_{x \to \infty} h_{q} = h_{q} \left(P, T_{q} \right),$$
$$\frac{\partial \rho_{q}}{\partial P} \left(P, T_{q} \right), \frac{\partial \rho_{q}}{\partial T_{q}} \left(P, T_{q} \right),$$
$$\frac{\partial h_{q}}{\partial P} \left(P, T_{q} \right), \frac{\partial h_{q}}{\partial T_{q}} \left(P, T_{q} \right)$$
(4)

После учета всех замыкающих соотношений может быть получено решение относительно независимых переменных $(P, \alpha_2, ..., \alpha_n, \mathbf{v}_1, ..., \mathbf{v}_n, T_1, ..., T_n)$.

Межфазное трение

Учитывается добавлением в правую часть уравнения движения для фазы *q* члена

$$\sum_{p=1}^{n} \mathbf{R}_{pq} = \sum_{p=1}^{n} K_{pq} \left(\mathbf{v}_{p} - \mathbf{v}_{q} \right)$$
(5)

Здесь $K_{pq} \left(=K_{qp}\right)$ – коэффициент межфазного обмена импульсом. В общем виде формула для этого коэффициента записывается как

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6\tau_p} d_p a_i \tag{6}$$

где $f - \phi$ ункция трения, τ_p – время релаксации,

$$\sigma_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_a} \tag{7}$$

Функция трения может находиться множеством способов. Простейший из них – постоянный коэффициент трения. В ПК ЛОГОС помимо функции трения с постоянным коэффициентом реализованы функции трения по моделям Шиллера – Науманна [3], Морси – Александра [4], Вонга [5] и симметричная модель. Опустим здесь подробное описание каждой модели в виду множества коэффициентов в них.

Тестирование

Задача об ускорении капель воды воздушным потоком

В движущийся с постоянной скоростью поток воздуха впрыскиваются водянные капли. Необходимо исследовать изменение скорости капель, увлекаемых потоком.

В данном случае непрерывная фаза – это воздух, движущийся со скоростью 5 м/с, а дисперсная фаза – вода, движущаяся со скоростью 1 м/с. Диаметр частиц воды равен 0,0005 м.

Целью данной задачи является исследование ускорения дисперсной фазы благодаря влекущей силе непрерывной фазы. Геометрия задачи представлена на рис. 1.



Рис. 1. Геометрия задачи

В данной задаче моделируется многофазное ламинарное течение. Концентрация воды берется равной 1 %. Расчет производится в стационарном режиме до сходимости, точность получаемого решения была задана равной 10^{-6} .

Расчеты проводились с использованием разных моделей межфазного трения. В табл. 1 приведены полученные значения скорости воды в выходном сечении.

Таблица 1

Скорость воды в выходном сечении

Модель трения	Скорость воды в выходном сечении			
-	канала, м/с			
Постоянное трение, коэффициент 0,44	3,0832			
Шиллер – Науманн	3,7469			
Морси – Александр	3,7289			
Вонг	3,3110			
Симметричная модель	4,4345			

Видно, что выбор модели межфазного трения сильно влияет на итоговую скорость, поэтому очень важно использовать модель, наиболее подходящую конкретной задаче. Возможно, далее при расчете производственных задач понадобится реализация и других моделей межфазного трения, учитывающих особенности течения.

Задача о разделении фаз в поле силы тяжести

Целью данной задачи является моделирование отстаивания двухфазной смеси в прямоугольном резервуаре. Предполагается, что смесь внутри резервуара на 90 % состоит из воды и на 10 % – из воздуха. Из-за действия сил гравитации более тяжелая фаза концентрируется у основания резервуара, так происходит оседание. На конечный момент времени более тяжелая фаза полностью заполнит нижнюю часть резервуара, два вещества разделят расчетную область согласно значению объемной доли каждого вещества. Геометрия задачи и предполагаемый результат представлены на рис. 2.

В данной задаче моделируется многофазное ламинарное течение. Расчет производится в нестационарном режиме до 12 секунд с шагом 0,02 секунды. На рис. 3 представлено распределение объёмной доли несущей фазы на моменты времени





Рис. 2. Геометрия задачи



Рис. 4. Поперечное сечение расчетных сеток

1 секунда, 3 секунды, 5 секунд, 7 секунд, 9 секунд и 12 секунд соответственно.

Далее было проведено исследования влияния сетки на результаты моделирования. Рассмотрено 3 различных геометрии: «плоскость», «кольцо» и «цилиндр». Также на цилиндре было построено 3 различных типа сеток: «сектор», «блочная» и «сеткабабочка». Для более наглядного представления поперечное сечение расчетных сеток показано на рис. 4.

На рис. 5 приведена зависимость средней по сечению концентрации воздуха от времени в центральном сечении резервуара для всех рассматриваемых типов сеток.

Рис. 3. Распределение концентрации воды на разные моменты времени



Рис. 5. Зависимость концентрации воздуха от времени в центральном сечении резурвуара

Наибольшее отклонение результатов наблюдается на сетке «кольцо», что, скорее всего, связано с влиянием дополнительной внутренней стенки.

<u>Задача о моделировании выхода газа через</u> <u>полупроницаемую стенку</u>

В прямоугольный резервуар с текущей водой через отверстия снизу подается воздух. Верхняя стенка проницаема для воздуха, но непроницаема для воды. В данной задаче учитывается сила тяжести и используется k—є модель турбулентности для многофазных течений. Геометрия задачи приведена на рис. 6.



Рис. 6. Геометрия задачи и границы

Подобные процессы, т. е. всплытие газа в жидкости лежит в основе работы ряда промышленных установок, например, в барботажных колоннах, при аэрации, кипении, дистилляции и абсорбции. Расчет производится в стационарном режиме до 1000 итерации. Задача считалась с двумя моделями трения: Шиллера – Науманна и Вонга. На рис. 7 представлен профиль распределения концентрации воздуха в продольном сечении резервуара. На рис. 8 показан массовый расход пузырьков воздуха, выходящих через полупроницаемую границу резервуара в различных постановках. В табл. 2 представлены численные значения массового потока воздуха на всех границах и общий дисбаланс массы в системе, по которому можно судить о сходимости задачи.

Из рисунков 7, 8 видно, что выбор модели межфазного трения существенно влияет на результаты моделирования.





Рис. 7. Распределение концентрации воздуха в продольном сечении резервуара

Рис. 8. Массовый расход воздуха [кг/с] на полупроницаемой границе

Межфазное	Границы				Лисбаланс	%
трение	Degassing_Outlet	Gas_Inlet	Outlet	Water_Inlet		, .
Шиллер – Науманн	3.84063e-04	-4.337e-04	4.9694e-05	-2.9603e-13	1.4003e-09	3.228e-04
Вонг	4.33128e-04	-4.337e-04	6.3216e-07	-2.9603e-13	1.1647e-09	2.685e-04

Заключение

Проведенные расчеты двухфазных течений подтверждают работоспособность модуля эйлеровой многофазности ПК «ЛОГОС» по следующим показателям:

• выполнение законов сохранения массы и импульса;

• корректный учет внешних сил (гравитация);

• корректный учет влияния турбулентности (k-є модель);

• корректный учет внутренних взаимодействий (межфазное трение).

В дальнейшем планируется расширять круг решаемых задач, ориентируясь на практически значимые постановки.

Литература

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред (в 2-х частях) – М.: Наука, 1987.

2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения – Издательство «Мир», Москва, 1972.

3. Schiller L. and Naumann Z., Ver Z. Deutsch. Ing. 77. 318. 1935

4. Morsi S. A., Alexander A. J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems / J. Fluid Mech., September 26, 1972. 55(2). 193–208.

5. Wang C. Y., Cheng P. A multiphase mixture model for multiphase, multicomponent transport in capillary porous media – I. Model development. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996. 39/17 (3607-3618).

СТРОЕНИЕ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ

<u>А. С. Буркацкий,</u> Ю. Б. Кудасов, Д. А. Маслов, О. М. Сурдин

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Изучение структуры фронта ударной волны (ФУВ) в различных средах ведётся не один десяток лет. Наиболее изучен вопрос о строении фронта ударной волны в газообразной среде [1], выявлено существование скачка уплотнения и релаксационного слоя. При распространении ударной волны в плазме установлено возникновение на фронте двойного электрического слоя.

Изучение строения ФУВ в конденсированной среде осложняется большим количеством взаимодействий и необходимостью учёта нелинейности взаимодействия между частицами. В целях упрощения часто рассматривают модель одномерного кристалла. Одной из хорошо аналитически разработанных моделей твёрдого тела является модель цепочки частиц с нелинейным экспоненциальным взаимодействием [2]. В частности, для подобной цепочки найдено аналитическое решение для уединённой волны (солитона).

В работе предлагается новая итерационная методика расчёта распределения частиц на фронте ударной волны, основанная на законах сохранения массы, импульса и энергии вещества, пересекающего ФУВ.

Одномерный кристалл и ударная адиабата

Рассмотрим одномерный кристалл как цепочку одинаковых частиц, расположенных равноудаленно друг от друга вдоль прямой. Ограничимся только продольными перемещениями частиц. Вначале предположим, что взаимодействие имеет место только между ближайшими соседями. Потенциал взаимодействия между частицами выберем в форме Леннард – Джонса (рис. 1)

$$U = \frac{U_0}{n-m} \cdot \left(\frac{n \cdot a^m}{r^m} - \frac{m \cdot a^n}{r^n}\right),\tag{1}$$

где U_0 – потенциал взаимодействия в равновесном положении (глубина потенциальной ямы, взятая со знаком минус), m, n – параметры потенциала, характеризующие силы притяжения и отталкивания между двумя соседними частицами, r – расстояние между частицами, a – равновесное расстояние между частицами.



Рис. 1. Характерный вид потенциала Леннард – Джонса

Сила взаимодействия двух соседних частиц определяется через производную потенциала и всегда ориентирована так, чтобы установить равновесное расстояние между частицами

$$F(r) = -\frac{dU}{dr} = \frac{m \cdot n \cdot U_0}{n - m} \cdot \left(\frac{a^m}{r^{m+1}} - \frac{a^n}{r^{n+1}}\right).$$
(2)

Скорость звука в кристалле в невозмущенном состоянии равна

$$c = \sqrt{\frac{dF(\tau)}{d\tau}}\bigg|_{\tau=\tau_0=M\cdot a^{-1}} = \sqrt{-\frac{m\cdot n\cdot U_0}{M}},\qquad(3)$$

где $\tau = M/r$ и $\tau_0 = M/a$ – массовые линейные плотности кристалла в произвольном и равновесном состоянии соответственно, M – масса частицы.

Для получения формулы ударной адиабаты в одномерном кристалле выпишем законы сохранения массы и импульса при прохождении вещества через ФУВ

$$\tau_0 \cdot D = \tau \cdot (D - u), \qquad (4)$$

$$\tau_0 \cdot D \cdot u = F - F_0, \tag{5}$$

где D – скорость ФУВ, u – скорость вещества за поверхностью разрыва, F и $F_0 = 0$ – силы парного взаимодействия за и перед поверхностью разрыва. При рассмотрении распространения ударной волны по ненапряжённому кристаллу $F_0 = 0$. Нормируем плотность вещества за ФУВ на плотность вещества до поверхности разрыва, скорости – на скорость звука в кристалле в невозмущенном состоянии, а силы – на $\tau_0 \cdot c^2$.

$$d = t \cdot (d - v), \tag{6}$$

$$d \cdot \mathbf{v} = f , \qquad (7)$$

1

где $t = \tau/\tau_0$ – обезразмеренная массовая линейная плотность кристалла, d = D/c – обезразмеренная скорость ФУВ, $\upsilon = u/c$ – обезразмеренная скорость вещества за ФУВ, $f = F/\tau_0 c^2$ – обезразмеренная сила парного взаимодействия, действующая между частицами за ФУВ.

С учётом выражений

$$F(\tau) = F(r)\Big|_{r=M/\tau} = \frac{m \cdot n \cdot U_0}{n-m} \cdot \left(\frac{a^m \cdot \tau^{m+1}}{M^{m+1}} - \frac{a^n \cdot \tau^{n+1}}{M^{n+1}}\right), (8)$$



$$F(t) = F(\tau)|_{\tau = \tau_0 \cdot t = (M/a) \cdot t} = \frac{m \cdot n \cdot U_0}{a \cdot (n - m)} \cdot \left(t^{m+1} - t^{n+1}\right), (9)$$
$$f(t) = \frac{F(t)}{\tau_0 \cdot c^2} = \left(t^{m+1} - t^{n+1}\right) / (m - n)$$
(10)

получаем систему трёх уравнений для нахождения параметров вещества за ФУВ в зависимости от обезразмеренной скорости ударной волны.

$$\begin{cases} d = t \cdot (d - v), \\ d \cdot v = f(t), \\ f(t) = (t^{m+1} - t^{n+1}) / (m - n). \end{cases}$$
(11)

Численное решение системы (11) позволяет построить графики зависимостей t(d), l(d), $\upsilon(d)$, f(d) – рис. 2–3. Отметим отдельно, что система имеет математическое решение в области d < 1, которое, однако, не имеет физического смысла, т. к. скорость ФУВ здесь меньше скорости звука. Поэто-



Рис. 2. Графики: а – зависимость плотности за ФУВ от скорости ФУВ, б – зависимость межчастичных расстояний за ФУВ от скорости ФУВ.



Рис. 1. Графики: а – зависимость скорости вещества за ФУВ от скорости ФУВ, б – зависимость силы парного взаимодействия за ФУВ от скорости ФУВ

му для этой области получены отрицательная скорость вещества и растяжение кристалла за ФУВ.

Теория расчёта распределения частиц во фронте ударной волны

Стационарность ударной волны обуславливает особое ограничение: при прохождении ФУВ через частицы вещества, каждая частица проходит через один и тот же набор состояний. Под состоянием в этом случае подразумевается скорость частицы и равнодействующая сила.

Расчет распределения будем вести итерационным методом. Воспользуемся законом сохранения масс ($\underline{6}$) и определением скорости для отдельных частиц

$$d = t_i \cdot (d - v_i), \qquad (12)$$

$$\upsilon_i = \upsilon_{i-1} + \Delta \upsilon_i \,, \tag{13}$$

где υ_i — обезразмеренная скорость *i*-ой частицы, $\Delta \upsilon_i$ — разница обезразмеренных скоростей *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц, t_i — обезразмеренная массовая линейная плотность в окрестностях *i*-ой частицы.

С учетом преобразований получим выражения удобные для расчета

$$l_i = \left(d - v_i\right) / d , \qquad (14)$$

$$\upsilon_i = \upsilon_{i-1} + \frac{f_i}{d} \,, \tag{15}$$

где $l_i = 1/t_i$ – межчастичное расстояние между *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц, f_i – равнодействующая сила, действующая на *i*-ую частицу.

Вычисление равнодействующей силы f_i будем вести согласно формуле (16), выведенной из формулы (10) для всех частиц, а для последний частицы f_{count} , так как нет одного из соседей, нужно вводить дополнительную силу «поршня» F_{end} , которая бы действовала на частицу со стороны отсутствующего соседа (17). По сути, сила является силой парного взаимодействия с соседней частицей. Эта сила «поршня» является решением системы (11).

$$f(l_i) = \left(l_i^{-m-1} - l_i^{-n-1}\right) / (m-n), \qquad (16)$$

$$f_N = F_{end} - \left(l_N^{-m-1} - l_N^{-n-1} \right) / (m-n).$$
(17)

Тогда получим систему уравнений (18)

$$\begin{cases} f_{i} = \left(\left(l_{i+1}^{-m-1} - l_{i+1}^{-n-1} \right) - \left(l_{i}^{-m-1} - l_{i}^{-n-1} \right) \right) / (m-n), \\ f_{N} = F_{end} - \frac{l_{N}^{-m-1} - l_{N}^{-n-1}}{m-n}, \\ \upsilon_{i} = \upsilon_{i-1} + \frac{f_{i}}{d}, \\ l_{i} = (d - \upsilon_{i}) / d. \end{cases}$$
 (18)

Эта система должна решаться в итерационном цикле программы. Блок-схема программы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема программы по расчету распределения частиц во фронте ударной волны

Начальное распределение межчастичных расстояний, может быть выбрано произвольно, так как итерационный метод предполагает нахождение по приближенному распределению некоторой величины следующего приближения, являющегося более точным. Метод позволяет получить распределение с заданной точностью, ограниченной вычислительными мощностями компьютера. Чтобы распределение было получено с заданной точностью за меньшее количество итераций, начальное распределение следует выбрать как можно ближе к целевому. Начальное распределение подается в итерационный цикл, где происходит расчет равнодействующих сил, действующих на частицы, массовой местной плотности, скорости вещества и пересчет межчастичных расстояний в ФУВ (18). Входными данными для итерации k+1 будет являться изменённое распределение частиц в итерации k (19).

$$\overline{l_{in}^{k+1}} = \overline{l_{in}^{k}} + \alpha \cdot \left(\overline{l_{out}^{k}} - \overline{l_{in}^{k}}\right), \tag{19}$$



Рис. 5. Графики: а – распределения плотности по частицам, б – распределения межчастичных расстояний по частицам



Рис. 6. Графики: а – распределения скорости вещества по частиц, б – распределения силы парного взаимодействия по частицам

где вектор $\vec{l} = \{l_1, l_2, l_3, ..., l_{N-1}, l_N\}$ определяет набор межчастичных расстояний, $\vec{l}_{out}^{\vec{k}}$ – набор, полученный в итерации *k* в результате подстановки набора $\vec{l}_{in}^{\vec{k}}$ на вход системы (18), где α – подстроечный параметр, варьируемый в пределах 0...1. При значении параметра $\alpha = 1$ на вх од в итерацию *k*+1 будет подан набор $\vec{l}_{out}^{\vec{k}}$. Однако, подобный подход часто не позволяет достигнуть сходимости. Поэтому в работе используется постепенный переход к новому состоянию за счёт выбора дробного значения для параметра α .

Цикл будет выполняться до тех пор, пока не будет выполняться условие

$$\Delta < \varepsilon, \tag{20}$$

где Δ есть наибольший по модулю элемент вектора $\vec{l^k} - \vec{l^{k-1}}$, ε – заданная точность.

Когда условие (20) будет выполнено, итерационный цикл завершится. Полученные в результате расчёта распределения межчастичных расстояний, равнодействующих сил, плотности и скоростей частиц в ФУВ показаны на рис. 5–6.

Способ (19) эволюции системы может быть улучшен с целью уменьшения числа итераций. При достижения специального критерия самосогласования, например,

$$\left| l_{out(i)}^{k} - l_{in(i)}^{k} \right| < \delta , \qquad (21)$$

где $l_{out(i)}^k$ – межчастичное расстояние между *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц на выходе из итерации *k*, $l_{in(i)}^k$ $l_{out(i)}^k$ – межчастичное расстояние между *i*-ой и (*i*-1)ой частиц на входе в итерацию *k*, δ – пороговое число для специального критерия самосогласования, может быть уменьшен характерный шаг перехода от «старого» состояния к «новому»



Рис. 7. Графики зависимости Δ от номера итерации: a – α₂ = 0, б – α₂ = 0, 1, в – α₂ = 1, г – сравнение зависимостей в начале цикла самосогласования

$$I_{in}^{k+1}{}_{(i)} = \begin{bmatrix} I_{in(i)}^{k} + \alpha_{1} \cdot \left(I_{out(i)}^{k} - I_{in(i)}^{k} \right), & \left| I_{out(i)}^{k} - I_{in(i)}^{k} \right| \ge \delta \\ I_{in(i)}^{k} + \alpha_{1} \cdot \alpha_{2} \cdot \left(I_{out(i)}^{k} - \overline{I_{in}^{k}} \right), \left| I_{out(i)}^{k} - I_{in(i)}^{k} \right| < \delta \end{bmatrix}, (22)$$

где α₁ – подстроечный параметр, варьируемый в пределах 0...1, α₂ – дополнительный подстроечный параметр, варьируемый в пределах 0...1.

Таким образом, эффективный подстроечный параметр $\alpha_1 \alpha_2$ будет разным для разных $l_{in}^{k+1}(i)$, в зависимости от того, выполняется ли специальный критерий самосогласования (21) или нет.

Для достижения неограниченной точности расчёта предлагается постепенное уменьшение порога $\delta_{New} = 0.8 \cdot \delta_{Old}$, например, при достижении условия (21) для заданного количества частиц М.

$$If \infty \left[m \le M, \delta_{New} = 0, 8 \cdot \delta_{Old} \right], \tag{23}$$

где m – число частиц, для которых не выполняется условие (22).

Характерные графики сходимости вектора \vec{l} представлены на рис. 7.

В зависимости от скорости ФУВ была посчитана его ширина. Ширина ФУВ считается, как сумма межчастичных расстояний частиц, которые находятся в ФУВ. Частица находится в ФУВ, если она удовлетворяет условию (25). График зависимости ширины ФУВ от скорости ФУВ представлен на рис. 8.



Рис. 8. График зависимости ширины ФУВ от скорости ФУВ

$$l_{1} - 0,99 \cdot (l_{1} - l_{N}) \le l_{i} \le l_{1} - 0,01 \cdot (l_{1} - l_{N}), \qquad (25)$$

где l_i — межчастичное расстояние между *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц, N — количество частиц в расчете.

При устремлении скорости ФУВ к скорости звука в невозмущённом кристалле количество частиц в ФУВ увеличивается. При этом амплитуда ФУВ уменьшается. При нарастании скорости ФУВ его ширина быстро уменьшается до нескольких межчастичных расстояний и затем меняется слабо при дальнейшем увеличении скорости ФУВ.

Заключение

В работе предложена методика расчёта структуры ФУВ. Методика опробована на примере одномерного кристалла, составленного из частиц, взаимодействующих между собой согласно потенциалу Леннард – Джонса. Показана возможность самосогласованного решения. Получены характеристики частиц в ФУВ. Исследовано поведение ширины ФУВ от её скорости. Предполагается дальнейшее развитие методики для исследования структуры ФУВ реальных кристаллов посредством выполнения квантовомеханических расчётов.

Литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М.: Наука, 1966.

2. Тода М., Теория нелинейных решёток, 1984.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КАСКАДОВ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ПОМОЩЬЮ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

И. Ю. Забавичев, С. В. Оболенский, А. А. Потехин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Уменьшение топологических норм изделий микроэлектроники увеличивает их чувствительность к сбоям и отказам, вызванных воздействием отдельных ядерных частиц [1], что обусловливает актуальность моделирования процессов ионизации и дефектообразования в субмикронных полупроводниковых структурах при воздействии ионизирующих излучений. Это связано с тем, что размеры разупорядоченной области – кластера радиационных дефектов (КРД), образовавшегося в результате воздействия высокоэнергетичной тяжелой частицы, становятся сопоставимы с размерами активной области современный полупроводниковых приборов [2]. Каскады атомных смещений выступают в качестве ловушек для носителей заряда, в следствии чего вокруг скопления дефектов образуется область пространственного заряда. В результате из-за рассеяния носителей заряда на скоплении заряженных дефектов уменьшается подвижность в активной области полупроводникового прибора, что приводит к деградации его характеристик.

В зависимости от энергии первичной частицы каскады атомных смещений подразделяют на разреженные, в которых длина пробега движущихся частиц больше, чем расстояние между покоящимися атомами кристаллической решетки и плотные, которые характеризуются малой длиной пробега частиц. Реальные кластеры радиационных дефектов могут сочетать в себе признаки как разреженных, так и плотных каскадов, поэтому разные стадии развития разупорядоченной области требуют численной оценки её размеров с различными временными и пространственными масштабами.

В настоящее время существует широкий спектр методов моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе [3], которые можно разделить на 4 класса: квантово-механические методы «из первых принципов», методы классической молекулярной динамики, методы парных взаимодействий (алгоритмы Монте-Карло) и континуальные методы, основанные на законах тепломассопереноса в сплошной среде. Данные методы различаются пространственным и временным разрешением, что позволяет применять их как независимо друг от друга, так и комбинировать для получения необходимой информации о динамике развития каскадов атомных смещений в полупроводниковых материалах. Представленные алгоритмы имеют также различную вычислительную сложность, которая определяется индивидуальным набором параметров для каждого метода. Для достижения желаемого пространственного или временного разрешения зачастую необходимо задействовать большое число вычислительных ресурсов для получения результата за требуемое время, используя при этом суперкомпьютерные технологии и параллельные вычисления. Целью данной работы является моделирование образования кластеров радиационных дефектов с помощью суперкомпьютерных вычислений.

Математическая модель

Процесс формирования каскада атомных смещений в результате воздействия потока нейтронов быстрого спектра деления протекает следующим образом: в результате упругого взаимодействия частиц с ядрами атомов вещества последние смещаются из положения равновесия в узлах кристаллической решетки, увлекая за собой электронную оболочку атома, то есть происходит образование первичных дефектов – пары вакансия-межузельный атом (пара Френкеля). В случае, когда скорость смещения ядра будет больше скорости орбитальных электронов, может произойти ионизация. После того, как атом вещества получил от нейтрона кинетическую энергию, он будет двигаться в кристаллической решетке подобно иону, внедренному в материал извне. При этом, если полученной энергии достаточно для дальнейшего движения, сопровождающегося столкновениями с покоящимися атомами, процесс будет развиваться лавинообразно. Таким образом, в результате каскадов смещений атомов в полупроводнике помимо отдельных точечных дефектов будут формироваться кластеры радиационных дефектов.

В основе квантово-механических методов «из первых принципов» лежит определение траекторий движения ядер кристаллической решетки и электронов из решения уравнения Шредингера. Для упрощения задачи перемещение электронов рассматривается как движение независимых частиц в потенциале, создаваемом другими электронами и атомными ядрами. Однако, в силу вычислительной сложности метод ограничен системами, состоящими из нескольких сотен атомов, чья динамика моделируется в течение нескольких фемтосекунд. Поэтому в настоящее время квантово-механический метод на практике для моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе не применяется.

Следуя по пути упрощения задачи, можно рассматривать электронную и атомную подсистему отдельно друг от друга. В этом случае возможно отказаться от квантово-механического описания развития каскада атомных столкновений, заменив уравнение Шредингера законами классической механики. Метод молекулярной динамики основан на использовании II закона Ньютона для каждого атома системы:

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = -\nabla_{\mathbf{r}_i} U(\mathbf{r}) + F_{\text{BHeIII}}$$
(1)

где $U(\mathbf{r})$ – межатомный потенциал взаимодействия, m_i – масса *i*-го атома, \mathbf{r}_i – положение в пространстве *i*-го атома, $F_{\text{внеш}}$ – внешняя сила.

Двумя основными аспектами, характеризующими практическую реализацию метода молекулярной динамики, являются выбор способа интегрирования уравнения (1) в зависимости от граничных условий рассматриваемой системы и выбор межатомного потенциала. Для системы из N атомов уравнение (1) представляет систему из ЗN дифференциальных уравнений второго порядка. Эту систему можно выразить как 6N дифференциальных уравнений первого порядка, представив скорость в качестве отдельной переменной. Получившуюся систему уравнений можно решить с помощью метода конечных разностей для нахождения траекторий движения атомов. Параллельные вычисления вместе с пространственной декомпозицией задачи позволяют применять методы молекулярной динамики для исследования поведения систем, состоящих из $10^6 - 10^9$ атомов [3].

Межатомный потенциал $U(\mathbf{r})$, входящий в уравнение (1) в общем виде можно представить следующим выражением:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_{i} \sum_{j>i} U_2(\mathbf{r}_{ij}) + \sum_{i} \sum_{j\neq i} \sum_{k\neq j\neq i} U_3(\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{r}_{jk}, \mathbf{r}_{ik}) + \dots$$
(2)

где $U_2(\mathbf{r}_{ij})$ описывает зависимость потенциальной энергии только от расстояния между каждой парой атомов системы \mathbf{r}_{ij} , а потенциалы *n*-порядка описывают взаимодействие атомов системы в зависимости от их пространственного расположения и угловой ориентации. Для большинства практических задач, в том числе моделирования развития областей разупорядочивания при радиационном воздействии, разумно ограничиться слагаемыми второго и третьего

порядка в выражении (2), так как влияние потенциалов более высоких порядков быстро спадает с ростом n.

Выбор конкретного потенциала для моделирования методом молекулярной динамики процесса развития каскада атомных столкновений определяется типом исследуемого материала, желаемой точностью и доступными вычислительными ресурсами. Потенциалы можно разделить на потенциалы парного взаимодействия, многочастичные эмпирические потенциалы и квантово-механические. Потенциалы парного взаимодействия, такие как потенциалы Леннарда – Джонса и Морзе [4], используются для моделирования многомасштабных систем, когда вычислительная эффективность является наиболее приоритетной. Для полупроводниковых материалов, в которых важным является многочастичное взаимодействие [5], при расчетах используются потенциалы Стилленгера – Вибера [6], Терсоффа [7] и Бриннера [8]. Данные потенциалы были получены эмпирическим путем на основе параметрической аппроксимации экспериментальных результатов или квантовомеханических расчетов соответствующих атомных конфигураций. В качестве таких параметров аппроксимации могут выступать постоянная решетки, энергия связи, константы упругой деформации и энергия образования вакансий. Однако погрешность параметрической аппроксимации межатомного потенциала может привести к нефизичным результатам моделирования процесса формирования каскада атомных смещений [9].Поэтому выбор потенциала, описывающего взаимодействие атомов вещества, для расчетов динамических параметров кластера радиационных дефектов должен быть обоснован исходя из информации, полученной из дополнительных оценок.

Пространственные и временные ограничения метода молекулярной динамики обусловлены теми же причинами, что и у квантово-механических методов, и позволяют моделировать образования кластеров радиационных дефектов в объеме до сотен нанометров в течении нескольких сотен пикосекунд. Шаг временного интегрирования должен соответствовать динамике протекающих процессов и может изменяться в течении процедуры моделирования для увеличения эффективности вычислений.

Для дальнейшего увеличения пространственных и временных масштабов моделирования процесса формирования разупорядоченной области радиационных дефектов необходимо перейти от детерминированного подхода для описания протекающих явлений к стохастическому. Метод Монте-Карло основан на модели дефектообразования в аморфном твердом теле, в которой процессы взаимодействия атомов вещества описываются моделью упругих шаров. Считается, что при столкновении атом смещается из своего равновесного положения, если приобретенная им в результате удара энергия больше некоторой пороговой энергии. Для полупроводниковых материалов эта энергия лежит в диапазоне нескольких десятков электронвольт. Кинетическая энергия T_A , передаваемая частице при столкновении с другой, определяется выражением [10]

$$T_A = \frac{4M_A M_B}{\left(M_A + M_B\right)^2} T_B \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{3}$$

где M_A, M_B – масса покоящейся и налетающей частиц, T_B – кинетическая энергия налетающей частицы, θ – угол отдачи между направлениями движения налетающей частицы до и после столкновения в системе отсчета, связанной с центром масс. При изотропном рассеянии значения углов отдачи равновероятны в диапазоне от 0 до 2π , в реальных условиях рассеяние как правило не изотропно, а предпочтительно в направлении распространения.

При моделировании методом Монте-Карло траектория каждого атома начинается с введения его положения, направления движения и энергии. Затем прослеживается последовательность столкновений с атомами вещества, а между столкновениями свободный пробег атома предполагается прямолинейным. На пути каждого свободного пробега энергия частицы уменьшается на величину электронных потерь энергии, а затем, после столкновения, - на ядерные или упругие, потери энергии, т. е. на величину энергии, переданной атому мишени при столкновении. Если атом вещества получает энергию, которая превышает предварительно заданное значение, то его называют вторичным атомом отдачи и его поведение прослеживается таким же образом, как и поведение налетающего. Это же остается справедливым для любых последующих атомов отдачи. Траектория атома отдачи обрывается, если его энергия уменьшается до предварительно заданного значения.

Расчет методом Монте-Карло основан на модели парных столкновений, в которой поведение налетающего атома определяется рядом последовательных столкновений с атомами мишени. Это допущение может не соблюдаться при очень низких энергиях, когда заметное рассеяние атомов происходит даже на большом удалении от ядер атомов вещества. В этом случае атом может взаимодействовать одновременно более чем с одним атомом мишени и раздельное рассмотрение таких столкновений с очень малым свободным пробегом между ними может привести к существенной ошибке. Другими словами, модель парного взаимодействия применима для описания высокоэнергетической части реальных каскадов в большинстве твердых тел, однако низкоэнергетическая часть на самом деле ведет себя как плотный каскад.

Ограничение метода Монте-Карло связано не с пространственными масштабами решаемой задачи, а с числом реализаций каскадов атомных смещений для получения усредненных характеристик – размеров разупорядоченной области и числа пар Френкеля. Так как метод Монте-Карло является статистическим, то точность результатов моделирования пропорциональна \sqrt{N} , где N – число реализаций. К недостаткам метода относится то, что с его помощью нельзя оценить ни временную динамику образования кластера радиационных дефектов, ни изменение его структуры на стадии отжига.

Для моделирования процессов отжига радиационных дефектов на больших пространственных и временных масштабах часто применяются континуальные методы. Большее пространственное и временное разрешение в этом случае достигается за счет перехода от рассмотрения отдельных атомов (как движущихся, так и связанных в кристаллическую решетку) исследуемого материала к непрерывной (сплошной) среде, бесконечно малому объему которой можно приписать определенные значения термодинамических переменных.

Рассматриваемая среда описывается плотностью $\rho(\mathbf{r},t)$, гидродинамической скоростью $u(\mathbf{r},t)$, давлением $p(\mathbf{r},t)$ и температурой $T(\mathbf{r},t)$, которые изменяются как во времени, так и в пространстве. Записав законы сохранения для разупорядоченной области радиационных дефектов, можно получить систему дифференциальных уравнений, определяющих эволюцию введенных гидродинамических параметров.

Закон сохранения массы, который гласит, что полная масса вещества, содержащаяся в некотором произвольном объеме V может измениться только изза «втекания» или «вытекания» вещества через окружающую объем замкнутую поверхность S, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho u \right) = 0 \tag{4}$$

где ри – импульс единицы масс.

Закон сохранения импульса и энергии описывается выражением (5) и (6) соответственно:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u\nabla\right)u = -\frac{\nabla p}{\rho} \tag{5}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u\nabla u = -\frac{p}{\rho}\nabla u \tag{6}$$

где *е* – внутренняя энергия на единицу массы вещества.

Для получения однозначного решения системы уравнений (4)–(6) её необходимо дополнить уравнением состояния. Для решения получившейся системы дифференциальных уравнений в частных производных применяется конечно-разностный, конечноэлементный или конечно-объемный [11] метод аппроксимация задачи.

Континуальное представление основано на двух допущениях: во-первых, в каждом бесконечно малом объеме должно установиться локальное термодинамическое равновесие, а во-вторых, движущиеся атомы не должны иметь возможность покинуть заданный объем, предварительно не обменявшись импульсом и энергией с соседними атомами. Первое условие устанавливает нижнюю границу рассматриваемого времени значениями больше чем порядка 10^{-13} секунд, второе требует длины свободного пробега меньшей чем характерный размер бесконечно малого объема.

Анализ представленных методов показывает, что в настоящее время квантово-механические методы практически неприменимы для моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе, ввиду экстремально высокой вычислительной сложности. Таким образом, наиболее предпочтительным представляется комбинация методов классической молекулярной динамики (для плотных кластеров радиационных дефектов) и Монте-Карло (для разреженных кластеров радиационных дефектов) на формирования каскада стадии смещений $(T < 10^{-12} \text{ c})$ с методами тепломассопереноса на стадии быстрого отжига радиационных дефектов $(T < 10^{-9} c)$. В дальнейшей работе подробно рассматривается применение метода классической молекулярной динамики для моделирования процесса формирования каскада атомных смещений под действием потока мгновенных нейтронов спектра деления.

Результаты моделирования и их обсуждение

Для моделирования процесса формирования кластера радиационных дефектов в кремнии под действием потока быстрых нейтронов мгновенного спектра деления использовался пакет прикладных программ LAMMPS [12]. Размер расчетной области составил 400×400×400 А (4096000 атомов), в которой моделировалась эволюция разупорядоченной области атомных смещений в течении 100 пикосекунд, образованной первичным атомом отдачи кремния с кинетической энергией 3 кэВ. Данное значение энергии было выбрано из расчета, что кластер радиационных дефектов не будет распадаться на отдельные субкаскады. Вдоль трех ортогональных направлений использовались периодические граничные условия, тем самым, моделируя поведение атомов в объемном материале. Взаимодействие атомов вещества описывалось потенциалом [13], а для определения местоположения дефектов в моделируемой системе использовался метод, основанный на построении ячеек Вигнера – Зейтца. На рис. 1 представлена динамика изменения общего числа пар Френкеля и объема кластера радиационных дефектов в течение всего времени моделирования. Разупорядоченная область аппроксимировалась эллипсоидом вращения с помощью алгоритма, представленного в работе [14].



Рис. 1. Временная динамика процесса формирования кластера радиационных дефектов в кремнии

Как видно из рис. 1, в процессе формирования кластера радиационных дефектов можно выделить 4 характерные стадии: баллистический участок (до 0.04 пс), в течение которого первичный атом отдачи движется практически без столкновений; участок термического расширения (от 0,04 до 0,2 пс), на протяжение которого число дефектов в кластере стремительно нарастает; стадия первичной стабилизации (от 0,2 до 0,5 пс), которая характеризуется резким уменьшением числа дефектов за счет рекомбинации близких пар Френкеля, и стадия быстрого отжига (от 0,5 пс), которая может длиться несколько наносекунд, сопровождаясь при этом плавным по сравнению со стадией первичной стабилизации уменьшением числа дефектов за счет отжига. Медленный темп рекомбинации дефектов на последней стадии объясняется термостимулированной диффузией дефектов в остывающем объемном полупроводнике, поэтому для адекватного описания последующего отжига необходим больший промежуток времени физического моделирования (от единиц секунд до нескольких часов). Стоит отметить, что объем кластера радиационных дефектов на стадии быстрого отжига практически не меняется, в то время, как число дефектов в нем медленно уменьшается, что связано с рекомбинацией пар дефектов, расположенных в центре, а не на периферии разупорядоченной области.

На рис. 1 также приводятся для сравнения результаты моделирования образования кластера радиационных дефектов с помощью программы TRIM [15], в которой реализован метод Монте-Карло для парного взаимодействия, для тех же начальных условий. В конце моделируемого промежутка времени число пар радиационных дефектов и объем кластера, полученных с помощью метода молекулярной динамики меньше, чем результаты расчетов с помощью программы TRIM, что можно объяснить учетом явления отжига радиационных дефектов. Также результаты сравнения говорят о правильности выбора межатомного потенциала взаимодействия для проведения расчетов методом молекулярной динамики.



Рис. 2. Размеры кластера радиационных дефектов в различные моменты времени: а – стадия ударного расширения, б – стадии стабилизации и быстрого отжига



Рис. 3. Распределение попарных расстояний между дефектами (а, в, д) и пространственная топология кластера (б, г, е) в различные моменты времени: a – t = 0,1 пс; б – t = 0,1 пс; в – t = 0,2 пс; г – t = 0,2 пс (оконч. см. с. 68)



Рис. 3. (Окончание). Распределение попарных расстояний между дефектами (а, в, д) и пространственная топология кластера (б, г, е) д – t = 100 пс; е – t = 100 пс

Изменение геометрических размеров кластера радиационных дефектов с течением времени представлено на рис. 2а и 2б. Существенное увеличение размеров разупорядоченной области происходит в течение стадии ударного расширения, достигая своего максимума в конце (рис. 2а). Затем в процессе стабилизациии быстрого отжига происходит сжатие за счет рекомбинации пар дефектов, расположенных на периферии кластера (рис. 2б). В связи с разной скоростью протекания процессов ударного расширения и отжига радиационных дефектов, сжатие разупорядоченной области происходит намного медленнее, чем увеличение.

Для анализа топологии кластера использовалось распределение попарных расстояний между точечными дефектами. Оно представляет собой функцию N(r), где N – отношение числа дефектов, расстояние между которыми находится в интервале $(r, r + \Delta r)$, к общему числу дефектов в кластере. Такое распределение имеет характерные максимумы, положение которых определяет области скопления точечных дефектов. На рис. 3 представлены функции распределения попарных расстояний между точечными дефектами в различные моменты времени, построенные отдельно для вакансий и межузельных атомов, а также трехмерные топологии разупорядоченных областей.

Из представленных выше графиков следует, что до середины участка термического расширения (рис. За и Зб) формирование точечных дефектов происходит в основном вследствие взаимодействия первичного атома отдачи с атомами вещества, что приводит к появлению близкорасположенных максимумов в распределении попарных расстояний. Из-за того, что исходная энергия первичного атома отдачи невелика, отдельные субкластеры расположены близко друг к другу. В конце стадии термического расширения (рис. Зв и Зг) распределения попарных расстояний как вакансий, так и межузельных атомов внутри кластера близки к нормальным, что свидетельствует об однородной структуре каскада атомных смещений. После стадий стабилизации и быстрого отжига (рис. 3д и 3е) происходит перераспределение дефектов: вакансии собираются в центре кластера, в то время как межузельные атомы расположены в основном на его периферии.

Отдельно необходимо рассмотреть вопрос о нижнем временном пределе применимости метода тепломассопереноса для анализа процесса формирования каскада атомных смещений. Само понятие «температуры» не имеет смысла использовать для слишком малых временных масштабов, когда распределение по энергии в исследуемой системе отличается от максвелловского. На рис. 4 представлены распределения точечных дефектов по энергии є в различные моменты времени.

В начальный момент времени (рис. 4a) кластер радиационных дефектов состоит из нескольких частиц, чья энергия варьируется в широком диапазоне и получившееся распределение сильно отличается от распределения Максвелла. С течением времени число дефектов растет, а распределение приобретает вид максвелловского, что свидетельствует о достижения термодинамического равновесия в системе. Последующее остывание каскада атомных смещений приводит к тому, что распределение смещается в область низких энергий (рис. 4в). Из выше сказанного следует, что нижним пределом применимости континуального метода является начало фазы стабилизации.

Заключение

Подводя итоги необходимо отметить, что в настоящее время получение детальной информации об этапах формирования каскадов атомных смещений вплоть до стадии быстрого отжига радиационных



Рис. 4. Распределение межузельных атомов внутри кластера радиационных дефектов по энергии ε в различные моменты времени: а -t = 0,035 пс, б -t = 0,06 пс, в -t = 0,2 пс

дефектов за приемлемое время возможно только при помощи метода классической молекулярной динамики. Метод Монте-Карло в этом случае используется в качестве проверочного для оценки адекватности применения различных моделей межатомного потенциала взаимодействия. Для моделирования отжига радиационных дефектов на больших временных масштабах целесообразнее применять континуальные методы тепломассопереноса.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004.

2. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Деградация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников, 2017. Т. 51, № 11. С. 1520–1524.

3. Калин Б. А. и др. Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2008.

4. Vashishta P., Bachlechner M., Nakano A., Campbell T. J., Kalia R. K., Kodiyalam S., Ogata S., Shimojo F., Walsh P. Multimillion atom simulation of materials on parallel computers—nanopixel, interfacial fracture, nanoindentation, and oxidation // Appl. Surf. Sci., 2001, № 182, pp. 258–264.

5. Vvedensky D. D. Multiscale modelling of nanostructures // J. Phys.: Condens. Matter, 2004, № 16, pp. 1537–1576.

6. Carlsson A.E. Beyond pair potentials for transition-metals and semiconductors // Solid State Physics: Advances in Research and Applications, 1990, N_{2} 43, pp 1–91.

7. Stillinger F. H., Weber T. A. Computer simulation of local order in condensed phases of silicon // Phys.Rev. B, 1985, № 31 pp. 5262–5271.

8. Tersoff J. New empirical approach for the structure and energy of covalent systems // Phys. Rev. B, 1988, № 37, pp. 6991–7000.

9. D.W. Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of

diamond films // Phys. Rev. B, 1990, № 42, pp. 9458–9471.

10. Samolyuk Y. N., Osetskiy Y. N., Stoller R. E. Molecular dynamics modeling of atomic displacement cascades in 3C-SiC: comparison of interatomic potentials //Journal of Nuclear Materials, 2015. Vol. 465, pp. 83–88.

11. Вавилов В. С. Действие излучений на полупроводники. - М.: Физматгиз, 1963. С. 264.

12. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, Физматлит, 1997. С. 320. 13. Plimton S., Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J.Comput. Phys., 1995, vol. 117, pp. 1–19.

14. Stillinger F. H., Weber T. A. Computer simulation of local order in condensed phases of silicon, Phys. Rev. B, 1985, vol. 31, pp. 5262–5271.

15. L.G. Rounding of Polytopes in the Real Number Model of Computation // Mathematics of Operations Research, 1996, vol. 21, №. 2, pp. 307–320.

16. Ziegler J. F., Biersak J. P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. Pergamon, N.Y., 1996. – 192 p.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ

<u>А. В. Казанцев</u>, Д. Ю. Дьянов, К. В. Циберев, В. В. Борляев, А. А. Челаков, М. В. Медведкина, Е. И. Наумова, А. М. Гельберг

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

Введение

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС [1-2], предназначенный для комплексного математического моделирования процессов аэро-, гидро-, газодинамики, тепломассопереноса, турбулентного перемешивания и прочности с использованием ресурсов современных супер-ЭВМ. Разработка ведется в тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями. Одним из компонентов пакета программ ЛОГОС является модуль динамической прочности. Примером задач, решаемых с использованием модуля динамической прочности, может служить моделирование крэш-тестов, пробития различных преград, взрывных воздействий на конструкции и т.д. Для моделирования указанного класса задач в пакете программ ЛОГОС используются конечно-элементная и SPH [3] аппроксимации по пространству и конечно-разностная по времени. Имеется возможность связного моделирования SPH и конечно-элементной модели, что позволяет проводить расчеты динамического деформирования конструкций, в которых присутствуют области больших деформаций и разрушения.

В докладе отдельное внимание уделяется описанию некоторых новых возможностей, реализованных в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС в 2017-2018 гг.

Область применения

Потребность в математическом моделировании задач динамической прочности возникает в большинстве наукоемких отраслей промышленности: в атомной энергетике, аэрокосмической промышавтомобилестроении, машиностроении ленности, и др. Ниже приведено лишь несколько примеров задач, решение которых на предприятиях в настоящее время уже не обходится без математического моделирования. Для атомной энергетики это задачи обоснадежности транспортно-упаковочных нования комплектов для ядерного топлива при различных аварийных ситуациях и штатных режимах эксплуатации, анализ последствий аварийных ситуаций на ядерных энергетических установках, динамическая

прочность защитных сооружений атомных реакторов в условиях возможных аварий. В аэрокосмической отрасли актуальны расчёты следующих классов задач: обрыв лопатки работающего газотурбинного двигателя летательного аппарата, анализ последствий попадания птиц в различные элементы летательного аппарата, жесткая посадка без шасси, разрушение элементов шасси при взлете и посадке, проблемы высокоскоростного воздействия космического мусора на космические аппараты. На предприятиях автомобилестроения проводят расчёты динамическодеформирования конструкций транспортных го средств в результате аварийных ситуаций с анализом последствий для водителей и пассажиров (виртуальные крэш-тесты), моделируется работа подвески при различных режимах эксплуатации, проводится оценка безопасности экипажа бронированного автомобиля при подрыве и обстреле.

Основные принципы математической методики

Для описания физических процессов в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС используются современные физико-математические модели, подходы и алгоритмы. Расчёт задач выполняется на неструктурированных сетках. Для аппроксимации по пространству используется метод конечных элементов и метод сглаженных частиц (SPH). Для аппроксимации по времени применяется метод конечных разностей. Реализована возможность проведения расчёта связанных задач прочности, когда сеточная часть модели взаимодействует с sph-частицами.

Доступна обширная библиотека конечных элементов, включающая в себя шестигранные и тетраэдральные объемные элементы (линейные и квадратичные, с полным и сокращенным интегрированием), оболочечные элементы, балочные элементы, дискретные элементы (пружина, точечная масса). При решении задач с использованием сокращенного интегрирования могут возникать искажения счётной сетки, приводящие к снижению качества и точности расчета. В зарубежной литературе для обозначения данного эффекта используется термин «режим песочных часов», поскольку состояние сетки при таких
искажениях часто напоминает песочные часы. Для сглаживания подобных возмущений в пакете программ ЛОГОС доступны следующие алгоритмы: вязкостное сглаживание, вязкостное сглаживание с выделением режима возмущения, жесткостное сглаживание с выделением режима возмущения, жесткостное сглаживание для материалов близких к несжимаемым.

В модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС доступен широкий набор уравнений состояния вещества и моделей упругопластического деформирования и разрушения, среди которых имеются как широкоизвестные, используемые в большинстве коммерческих пакетов программ, а также набор моделей материалов, разработанных во ВНИИЭФ [1]. Доступны следующие модели:

уравнение состояния идеального газа;

полиноминальное уравнение состояния;

уравнение состояния Ми-Грюнайзена; модель упругого изотропного материала;

модель упругопластического материала с изотропным и кинематическим упрочнением; модель упругого ортотропного материала;

модели упругопластического материала с температурной зависимостью;

модель анизотропного материала;

модель упругого материала с эффектом ползучести;

модель упругопластического материала с разными пределами текучести на сжатие и растяжение;

модель вязкоупругого материала;

модель пористого материала с анизотропными свойствами;

модель материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования; модель грунтов и пеноматериалов;

модель резины Блатц-Ко;

модель Джонсона-Кука;

модель недеформируемого материала;

модель бетона и железобетона;

модель упругого композитного материала;

модель пользовательского материала;

модель керамики, стекла и других хрупких материалов.

Для моделирования разрушения доступны следующие критерии:

по максимальному давлению, по минимальному давлению,

по эквивалентному напряжению,

по минимальной главной деформации,

по максимальной главной деформации,

по сдвиговой деформации,

по главному напряжению,

по выбранному шагу,

критерий Тулера-Бутчера,

критерий Галилея-Лейбница,

критерий Кулона-Мора,

критерий Писаренко-Лебедева,

критерий Цая-Ву,

критерий Хоффмана,

критерий Мизеса-Хилла.

В настоящий момент в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС выполнена программная реализация алгоритмов контактного взаимодействия элементов конструкции с учетом их разрушения и трения. Основной идеей всех реализованных алгоритмов является отслеживание проникания одной части конструкции в другую и выработка контактных сил, препятствующих данному прониканию.

Расчет контактного взаимодействия разделен на два основных этапа: определение зоны контакта и вычисление контактных сил. Определение зоны контакта реализовано на основе алгоритма глобального поиска LPOCA (Linear POsition Code Algorithm) и алгоритмов локального поиска методом «узелсегмент» или «сегмент-сегмент».

Вычисление контактных сил проводится методом «штрафа» или методом множителей Лагранжа. Доступна возможность проведения расчёта задач, в которых расчётная модель представляет собой совокупность конечно-элементных и sph-подобластей с возможностью расчёта контактного взаимодействия между ними. Такой подход позволяет решать задачи динамической прочности, в которых возникают области больших деформаций и разрушений, сопровождающиеся разлетом вещества. Расчёт контактного взаимодействия между конечно-элементной моделью и моделью, представленной набором sphчастиц, выполняется на основе метода «штрафа» при подходе «узел-сегмент», где в качестве «узлов» рассматриваются sph-частицы, а в качестве «сегментов» – граничные сегменты конечно-элементной части расчётной области.

Для учета совместности деформаций несогласованных по сетке поверхностей в пакете программ ЛОГОС доступен алгоритм «склейка». Данный алгоритм накладывает связь между узлами расчётной сетки «подчиненной» поверхности и сегментами сетки «главной» поверхности. Для расчета указанной связи доступно два наиболее распространенных метода: метод кинематических связей и метод «штрафа».

Реализованные функциональные возможности позволяют проводить высокоточные имитационные расчёты широкого круга практических задач динамической прочности. Следует также отметить, что большинство задач данного класса характеризуется долгим временем счёта и требует больших вычислительных ресурсов. Конкурентоспособность пакета программ ЛОГОС по сравнению с ведущими пакетами программ инженерного анализа, такими как LS-DYNA [4], ABAQUS [5], AUTODYN [6], обеспечивается за счёт высокого уровня распараллеливания на смешанной модели (OpenMP+MPI). Данный подход выполняет геометрическую декомпозицию счётной области по MPI-процессам, взаимодействие между которыми осуществляется при помощи MPIсообщений. Внутри MPI-процессов реализовано распараллеливание на общей памяти с помощью

ОрепМР. Такой подход позволяет проводить комплексное моделирование на тысячах процессорных ядрах суперЭВМ с поддержанием высокого уровня эффективности использования вычислительных ресурсов.

Описание некоторых новых возможностей

Одним из условий успешного внедрения пакета программ ЛОГОС в полный цикл разработки изделий на предприятиях ОПК и высокотехнологичных предприятий гражданской отрасли является его наполнение наиболее востребованными моделями, доступными в ведущих коммерческих программах инженерного анализа. Далее приведено описание некоторых новых возможностей, реализованных в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС в 2017–2018 гг.

Модель бетона и железобетона

Необходимость реализации моделей бетона и железобетона в пакете программ ЛОГОС обусловлена потребностью учитывать различные воздействия на конструкции при решении динамических задач прочности, в частности – воздействия снарядов на бетонные и железобетонные преграды, падение тяжелого пассажирского самолёта на контаймент АЭС и т. д.

Одной из основных моделей материалов, используемых в промышленности при решении задач с использованием ведущих пакетов программ инженерного анализа, является модель бетона Джонсона-Холмквиста [7–13]. Эта модель известна тем, что не берет в рассмотрение третий инвариант тензора напряжений. Её можно применять к бетону, испытывающему большие деформации с большой скоростью и высокое давление. В связи с этим была проведена работа по введению в пакет программ ЛОГОС модели Джонсона-Холмквиста для описания деформирования и разрушения бетона. Так же проведена работа по реализации моделей бетона Pseudo-Tensor и RHT [14].

Железобетон традиционно рассматривается как композиционный материал, состоящий из двух совместно работающих моделей материалов: бетона и стали. В конечно-элементных расчетах, наряду с прямым объемным моделированием стержней арматуры, можно выделить следующие способы моделирования арматуры в железобетоне [14]:

1. Дискретный: узлы стержневых элементов для арматуры совпадают с узлами объемной конечно-элементной сетки для бетона. Согласно схеме дискретного связанного армирования, применяются стержневые элементы, которые имеют общие узлы с объемными элементами. Данная схема используется достаточно редко ввиду необходимости строгого геометрического совпадения узлов объемной сетки с расположением стержней арматуры;

2. Встроенный: узлы сеток арматуры и бетона не совпадают, но связаны уравнениями совместно-

сти. По схеме встроенного армирования также применяются стержневые элементы, но объемные и стержневые элементы имеют отдельные узлы, и при этом задаются уравнения связи между соответствующими степенями свободы в узлах. Таким образом, мы избегаем проблем с сеткой как в методе «общих узлов» (дискретной арматуре):

3. Распределенный: предполагается, что арматура равномерно распределена по элементам конечно-элементной сетки для бетона. При таком подходе явного моделирования арматурных стержней не происходит. В соответствии со схемой распределенного армирования арматура учитывается в объемных элементах неявно – как распределенная жесткость в направлении армирования. Материал арматуры может при этом считаться упругопластическим. Данный подход широко применяется в случае геометрически простых схем расположения арматуры в объемных бетонных массивах.

В пакете программ ЛОГОС реализованы все три метода моделирования арматуры в железобетоне, а также модель материала Pseudo-Tensor для метода распределенной арматуры. Кроме того для моделирования железобетонных конструкций реализован учет физической нелинейности для балочных элементов, которыми моделируется арматура.

Композиционные материалы

Композиционные материалы находят широкое применение в инженерной практике, так как позволяют создавать конструкции с уникальными весовыми, прочностными и диссипативными характеристиками, которых практически невозможно достичь исконструкционных пользованием традиционных материалов. Интерес к этим материалам обусловлен тем, что присущий им комплекс свойств и особенностей существенно отличает их от традиционных конструкционных материалов. Стоит отметить, прежде всего, высокую прочность и низкую плотность, а также возможность управления механическими и физическими характеристиками при создании материала конструкции. Свойства композитов зависят в первую очередь от свойств исходных компонентов: армирующих элементов и матрицы. Кроме того, их соединение даёт эффект синергизма, связанный с появлением у композиции свойств, не характерных для изолированных исходных компонентов.

Методы моделирования волокнистых и слоистых композитов:

1. Прямой метод моделирования волокон или слоев посредством объемных, оболочечных, балочных и когезионных элементов. Данный подход напрямую моделирует все волокна и слои композитного материала, но требует огромных вычислительных и людских затрат.

2. Метод, основанный на усредненных характеристиках (с использованием анизотропных и изотропных моделей и применения опции начальных напряжений в каждом элементе сетки). 3. Метод, основанный на модели многослойного слоистого материала (Laminate method). Композитный материал в данном подходе представляется пакетом однонаправленных слоев, с различными углами укладки друг относительно друга. Каждый слой представляет собой ориентированный материал, армированный параллельными волокнами.

В модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС реализован и используется в счете метод, основанный на усредненных характеристиках, и модель многослойного слоистого материала [7, 15–16].

Сварочные конструкционные соединения

Для реализации сварочных конструкционных соединений в пакете программ ЛОГОС был выбран подход, в котором точечное сварное соединение – это жёсткий балочный элемент, соединяющий узлы в узловой паре [7, 17]. Следовательно, вращение и перемещение соединённых узлов сварочного соединения осуществляется совместно. Реализовано хрупкое и пластическое разрушение. Хрупкое разрушение определяется результирующими силами, действующими на сварку, а пластическое разрушение определяется значением пластической деформации в узле точечной сварки. Хрупкое разрушение точечной сварки происходит в случае, если выполняется условие усилия на контактной поверхности. Разрушение точечной сварки в результате пластической деформации происходит в случае, если эффективная пластическая деформация узла превышает заданной значение. Это позволяет моделировать процесс отделения точечной сварки от листового металла, поскольку пластичностью обладает не сам точечный шов, а окружающий его материал. Узловые значения пластической деформации получаются с помощью метода наименьших квадратов по значениям, полученным в точках интегрирования элемента.

Контактное взаимодействие с учетом особенностей геометрической формы балочных и оболочечных элементов

В расчётной практике всё чаще встречаются ситуации, когда залогом получения точного результата, является учёт особенностей геометрической формы балочных и оболочечных элементов при расчёте контактного взаимодействия. Реализованные ранее в пакете программ ЛОГОС алгоритмы выполняют расчёт взаимодействия, анализируя проникание узлов сеточной модели через её поверхность. При этом используются подходы «узел-сегмент», либо «сегмент-сегмент». В пакете программ ЛОГОС реализован дополнительный подход «ребро-ребро» [7, 18], который позволяет описывать контактное взаимодействие даже без проникания узлов через граничные сегменты расчётной сетки. Примерами могут служить торцевой контакт оболочечных конструкций, а также балочный контакт.

«Склейка» с разрывом связи

Важной потребностью при имитационных расчётах является возможность моделирования разрыва поверхностей под действием определенных нагрузок. В пакете программ ЛОГОС для этого реализована «склейка» с разрывом связи по заданному критерию. Между потерявшими связь поверхностями далее идет расчёт стандартного контактного взаимодействия. В качестве критериев доступно нормальное либо касательное напряжение разрыва [7].

Различные формы непроницаемой поверхности

Набор граничных условий модуля динамической прочности пакета программ ЛОГОС дополнился несколькими видами формы жестких стенок. Теперь кроме бесконечной плоскости доступны следующие виды: ограниченная плоскость, цилиндр, сфера и призма [7].

Модель откола для модуля SPH

В задачах высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами важно учитывать процесс разрушения. В модуле SPH пакета программ ЛОГОС реализована модель откола с эрозионным механизмом и без него [6]. Критерии откола задаются через стандартные критерии разрушения в параметрах модели материала.

Кроме того реализована «склейка» sph-частиц с сеточной частью модели. Данная возможностью позволяет значительно сокращать количество sphчастиц в задачах, когда область вне зоны взаимодействия можно моделировать сеточной моделью с менее подробной дискретизацией. А также появилась возможность проведения расчётов в двумерной плоской и осесимметричной постановке методом SPH.

Результаты некоторых демонстрационных расчётов

В данном разделе приведены результаты некоторых демонстрационных задач, которые показывают работоспособность и функциональные возможности модуля динамической прочности пакета программ ЛОГОС.

Расчёт пробития стальным ударником железобетонной преграды

Рассматривается модельная задача пробития стальным ударником железобетонной преграды. Начальная скорость ударника составляет 400 м/с, угол атаки – 3°.

Для моделирования ударника использовался кусочно-линейный упругопластичный материал, для преграды – модель бетона Джонсона-Холмквиста. Армирование моделируется в балочном приближении, когда узлы сеток арматуры и бетона не совпадают, но связаны уравнениями совместности.



Рис. 1. Расчёт задачи пробития стальным ударником железобетонной преграды



Рис. 2. Расчёт попадания птицы в остекление летательного аппарата

На рис. 1 представлены результаты расчёта на один из моментов времени.

Данная задача показывает работоспособность реализованных алгоритмов для моделирования железобетона. Кроме того демонстрируется надежность алгоритмов пакета программ ЛОГОС в части расчёта сложного контактного взаимодействия с учетом процесса разрушения.

Расчёт попадания птицы в остекление летательного аппарата

Рассматривается модельная задача (параметры и геометрические размеры отличаются от реальной конструкции) о попадании птицы в остекление летательного аппарата. Масса птицы – 1,83 кг, начальная скорость – 160 м/с.

Размерность конечно-элементной модели стекла составляет 33 млн. элементов. Птица моделируется sph-подобластью и состоит из 3,5 млн. частиц.

В расчёте используются модельные параметры остекления с целью демонстрации работоспособности алгоритмов. На рис. 2 представлены результаты расчёта на один из моментов времени.

Данная задача демонстрирует работоспособность, заложенных в пакет программ ЛОГОС алгоритмов связного моделирования задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц. Кроме того показана корректность реализованных моделей деформирования и разрушения материалов, использованных в данном расчёте.

Разрыв технологического канала на периферии активной зоны реактора

Рассматривается задача по моделированию деформирования конструкции активной зоны реакторной установки под давлением пароводяной смеси при разрыве одного из технологических каналов.

Основным элементом активной зоны реактора является графитовая кладка, которая представляет собой цилиндр радиусом около 7 м и высотой 8 м, и включает в себя 2488 вертикальных графитовых колонн. Каждая колонна набрана из графитовых блоков, по центру которых проходит технологический канал (ТК).



а Рис. 3. Расчётная модель: а – общий вид; б – фрагмент конечно-элементной сетки



Рис. 4. Расчёт разрыва ТК реактора: а – общий вид зоны разрыва сверху; б – приближенный вид зоны разрыва

Конечно-элементная сетка была построена из объёмных восьмиузловых элементов и оболочных четырехузловых элементов общим числом 160 757 760. Общий вид расчётной модели и фрагмент конечноэлементной сетки приведены на рис. 3.

Моделирование проводилось в упругопластической постановке.

Нагружение кладки происходит в результате разрыва одного из периферийных ТК. Разрыв моделировался навязанным по определенному закону давлением. Расчет проводился в параллельном режиме с использованием 1250 вычислительных ядер. Общее время счета составило около 20 дней.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования на один из моментов времени.

Заключение

В работе представлено описание функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части решения задач динамической прочности. Отдельно рассмотрены некоторые новые возможности, реализованные в 2017–2018 гг. Расширение функциональности предназначено для решения не охваченных ранее актуальных классов задач предприятий ОПК и промышленности. Приведены результаты некоторых модельных задач, которые демонстрируют работоспособность и функциональные возможности модуля динамической прочности пакета программ ЛОГОС.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н.А., Дьянов Д.Ю., Корсакова Е.И., Косарим С.С., Кулыгина О.Н., Мышкина И.Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А.В., Симонов Г.П., Спиридонов В.Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А.А., Шувалова Е.В., Рябов А.А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2011.

2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2018. Вып. 1, С. 3–13.

3. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В., Стародубов С. В., Циберев К. В., Челаков А. А. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц / Под ред. Р.М. Шагалиева // Труды XV международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014.

4. [Электронный ресурс]: LS-DYNA | Livermore Software Technology Corp. Режим доступа: http://www.lstc.com/products/ls-dyna.

5. [Электронный ресурс]: Abaqus Unified FEA – SIMULIA by Dassault Systems Режим доступа: http://www.3ds.com/simulia/products/abaqus.

6. AUTODYN. Explicit Software for Nonlinear Dynamics. User manual // Century Dynamics Inc. – 2005.

7. Hallquist John O. LS-DYNA Theory Manual // Livermore Software Technology Corporation. – 2015.

8. Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures // I Proc. 14th Int. Symp. Ballistics. Quebec City, Canada, 26-29 September, 1993. Vol.2. P.591-600.

9. Polanco-Loria M., Hopperstad O.S., Borvik T., Berstad T. Numerical prediction of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model // Int. J. Impact Engng. 2008. Vol.35. No.5. P.290-303.

10. Kala J., Husek M. Improved Element Erosion Function for Concrete-like Materials with the SPH Method // Brno, Czech Republic, 2016

11. Meyer C. S. Development of Geomaterial Parameters for Numerical Simulations Using the Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Model For Concrete» // Weapons and Materials Research Directorate, June 2011.

12. Islam M. J., Swaddiwudhipong S., Liu Z. S. Penetration of concrete targets using a modified Holmquist-Johnson-Cook material model // International Journal of Computational Methods Vol. 9, N.4 (2012) p.19

13. Hanchak S. L., Forrestal M. J., Young E. R., Ehrgott J.Q. Perforation of concrete slabs with 48 MPa and 140 MPa unconfined compressive strengths // Int. J. Impact Engng. 1992. Vol.12. No.1. P. 1–7.

14. Лукин А. В., Модестов В. С. Конечноэлементное моделирование и анализ напряженнодеформированного состояния железобетонных конструкций // Санкт-Петербургский государственный политех нический университет. – 2014.

15. Голованов А. И., Тюленева О. Н., Шигабутдинов А. Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. – М.:ФИЗМАТЛИТ. - 2006.

16. Bathe K.J. Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. – 1996.

17. Yunki Baik. Spot weld modeling for vehicle durability performance with ANSA. 4th ANSA & μ ETA International Conference. – 2011.

18. Shen R. Wu, Lei Gu. Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics // A John Wiley & Sons Inc. Publication. – 2012.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ

<u>И. И. Каныгин</u>, М. Ф. Абдуллин, Р. А. Барабанов, А. Ю. Еременко, Д. Д. Кварацхелия, С. С. Косарим, А. О. Наумов, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберев, А. В. Юлин, В. А. Юносова

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

Введение

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ (ПП) ЛОГОС [1], предназначенный для комплексного математического моделирования процессов аэро-, гидро-, газодинамики, тепломассопереноса, турбулентного перемешивания и прочности с использованием ресурсов современных супер-ЭВМ. Разработка ведется в тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями.

Одной из составных частей пакета программ ЛОГОС является модуль решения задач статической, динамической и вибрационной прочности конструкций. В докладе представлено описание функциональных возможностей модуля пакета программ ЛОГОС в части решения статических задач прочности [2–3].

Особое внимание в докладе уделено описанию новых функциональных возможностей, реализованных в 2017–2018 гг. и направленных на расширение классов решаемых задач в интересах внедрения на предприятия авиационной, космической и судостроительной отраслей промышленности. К данным возможностям относится развитие методов моделирования балочных и оболочечных конструкций, методов учета контактного взаимодействия, методов моделирования конструкционных соединений.

Для демонстрации работоспособности представленных функциональных возможностей прочностного модуля ПП ЛОГОС в докладе представлены результаты решения методических и практических задач статического деформирования авиационных конструкций.

Особенности модуля решения статических задач прочности ПП ЛОГОС

В прочностном модуле пакета программ ЛОГОС для описания физических процессов реализуются современные физико-математические модели, подходы и алгоритмы.

• Метод конечных элементов (МКЭ) (явные и неявные схемы с использованием эффективных прямых и итерационных параллельных решателей СЛАУ). • Методы учета контактного взаимодействия материалов.

• Структурированные и неструктурированные сетки.

• Библиотека универсальных и специализированных конечных элементов.

• Набор моделей деформирования и разрушения конструкционных материалов.

• Алгоритмы взаимодействия твердотельных конструкций с газодинамической средой (Fluid Structure Interaction).

• Распараллеливание с использованием смешанной модели (OpenMP+MPI).

Перечисленные особенности конечно-элементной (КЭ) методики прочностного модуля ПП ЛОГОС обеспечивают решение широкого класса динамических, статических и вибрационных задач прочности, а также позволяют проводить расчеты связных и сопряженных задач в интересах как оборонных, так и гражданских отраслей промышленности.

В данном докладе представлено описание функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части решения статических задач прочности, или задач нахождения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при воздействии статических (не зависящих от времени) нагрузок.

Можно выделить следующие основные особенности модуля решения статических задач прочности в пакете программ ЛОГОС.

• Библиотека поддерживаемых типов конечных элементов включает в себя набор трехмерных элементов сплошной среды первого и второго порядка аппроксимации по пространству (шестигранники, треугольные призмы, тетраэдры и пирамиды с четырехугольным основанием), а также плоские оболочечные элементы и одномерные балочные элементы; для шестигранников реализован учет дополнительных функций формы и стабилизирующих добавок.

• Реализован широкий набор граничных условий и прикладываемых нагрузок, а также набор функциональных возможностей для моделирования конструкционных элементов расчетных моделей: жесткие связи, заклепочные и болтовые соединения, многоточечные ограничения и т. д.

• Набор моделей материального деформирования включает в себя модели упругого изотропно-

го/ортотропного/анизотропного материала, упругопластического материала (билинейная/мультилинейная диаграмма деформирования, изотропное/кинематическое упрочнение), набор моделей ползучести. Все модели материального деформирования предполагают зависимость материальных характеристик от температуры.

• Реализован учет эффектов физической (материальной) нелинейности (ползучесть, поврежденность, разномодульность, разрыхление), геометрической нелинейности (большие деформации/вращения), а также учет контактного взаимодействия.

• Адаптивная схема расчета шага статической прочности обеспечивает разбиение прикладываемой нагрузки на шаги и подшаги с процедурой автоматического выбора величины подшага по нагрузке. Использование автоматической схемы выбора подшагов по нагружению позволяет обеспечить сходимость численного линеаризованного решения на сильно нелинейном характере деформирования.

• Для решения глобальной системы линейных алгебраических уравнений реализованы интерфейсы к библиотекам прямых и итерационных решателей.

Следует отметить, что в ранних версиях (до 2017 года) прочностного модуля пакета программ ЛОГОС учет эффектов нелинейного деформирования (материальная, геометрическая нелинейность, контактное взаимодействие) был реализован лишь для моделей, состоящих из объемных конечных элементов, а моделирование балочных и оболочечных конструкций осуществлялось лишь в линейном приближении. Это существенно ограничивало классы решаемых задач статического деформирования конструкций и препятствовало внедрению прочностного модуля ПП ЛОГОС в расчетную деятельность предприятий авиационной, космической, судостроительной, автомобильной отраслей промышленности, т. е. предприятий, где значительная часть конструкций и конструкционных элементов моделируется балочными и оболочечными элементами. Примеры линейных практических расчетов в балочном и оболочечном приближении приведены на рис. 1–2.

Развитие функциональных возможностей в интересах моделирования тонкостенных и балочных конструкций

Для расширения класса решаемых задач и в интересах внедрения в расчетную деятельность предприятий аэрокосмической и автомобильной отраслей промышленности основное развитие модуля решения статических задач прочности ПП ЛОГОС в 2017–2018 гг. было направлено на расширение



Рис. 1. Линейный расчет НДС отсека авиационной панели



Рис. 2. Линейный расчет НДС силового каркаса автобуса

функциональных возможностей для моделирования в балочно-оболочечном приближении. Можно отметить следующие основные направления развития: моделирование балочных и оболочечных конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейностей; моделирование слоистых композиционных материалов; учет контактного взаимодействия между телами, моделируемыми в оболочечном приближении; развитие методов моделирования конструкционных соединений (болтовое, шарнирное, заклепочное соединения). Далее представлено описание особенностей реализации в ПП ЛОГОС данных функциональных возможностей.

Учет физической и геометрической нелинейностей в расчетах на оболочечных и балочных элементах

Среди результатов работ, проводимых в 2017–2018 гг. в рамках развития модуля статической прочности пакета программ ЛОГОС, необходимо выделить существенное расширение функциональных возможностей в части учета эффектов нелинейного деформирования тонкостенных и стержневых конструкций.

Для оболочечного и балочного конечных элементов реализована возможность проведения расчетов с учетом эффектов геометрической и физической нелинейностей.

Учет геометрической нелинейности выполнен на основе метода Corotational [4], использующегося для описания процесса деформирования, в котором реализуются большие повороты конструкции при малых деформациях.

Программная реализация алгоритмов расчета упругопластического деформирования базируется на теории течения [5–6] с изотропным и кинематическим видами упрочнения. При этом вычислительный алгоритм расчета параметров упругопластического деформирования в каждой точке интегрирования оболочечного элемента обеспечивает расчет компонент НДС, удовлетворяющих как соотношениям теории течения, так и условию плоского напряженного состояния.

При реализации конечно-элементных аппроксимаций оболочечного и балочного элементов для учета нелинейного характера распределения величин по толщине оболочки и профилю балки обеспечен учет расширенного числа точек интегрирования по толщине и профилю.

Модель слоистого композиционного материала

Авиационные композиты по большей части имеют слоистую структуру, а изделия являются тонкостенными конструкциями, поэтому для численного расчета поведения конструкций из слоистых тонкостенных композиционных материалов (КМ) широкое использование получили вычислительные методы теории многослойных оболочек. В модуле решения задач статической прочности пакета ЛОГОС модель многослойного КМ основана на представлении композита как пакета слоев, уложенных под различными углами укладки (рис. 3) и использовании теории оболочек при следующих предположениях.

• Слоистый КМ рассматривается как неоднородный по материальным свойствам монолит.

• Материал каждого слоя считается однородным и ортотропным, с осями упругой симметрии, направленными вдоль и поперек волокон.

• Деформации по толщине пакета непрерывны.

• Напряжения по толщине слоя непрерывны и связаны с деформациями уравнениями обобщенного закона Гука для плосконапряженного состояния оболочек.



Рис. 3. Модель многослойного композитного материала в модуле решения задач статической прочности ПП ЛОГОС

В качестве модели слоя КМ используется модель ортотропного оболочечного элемента со смещением срединой плоскости. Реализованная в ПП ЛОГОС конечно-элементная аппроксимация оболочечного элемента в слое КМ построена на использовании следующих принципов.

• Использование трехмерных уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием численного интегрирования с возможностью задания произвольного количества точек интегрирования по толщине оболочки.

• Использование изопараметрического представления конечного элемента, линейной аппроксимации геометрии оболочки, линейной аппроксимации вектора перемещений по толщине оболочки.

• Применение специальных методов учета малости напряжений (напряжения обжатия вдоль направления толщины в локальной системе координат пренебрежительно малы).

• Учет разнотолщиности оболочки в узлах конечного элемента.

• Учет смещения срединной плоскости как слоя, так и композита в целом.

• Учет модели материала слоя (изотропный, ортотропный плосконапряженный материал) с учетом материальной системы координат композита и слоя.

• Использование ковариантного метода расчета тензора деформации.

• Использование специальных методов стабилизации против заклинивания при поперечном сдвиге (метод MITC), против заклинивания при мембранной деформации (метод EAS).

• Использование итеративно-инкрементального метода пошагового нагружения для расчета нелинейных задач механики деформируемого твердого тела.

• Использование метода Update Lagrangian и Corotational для расчета геометрически нелинейных задач тонкостенных конструкций (учет больших перемещений/вращений).

Учет контактного взаимодействия между телами, моделируемыми в оболочечном приближении

На практике при решении задач статического деформирования часто необходимо учитывать контактные явления, возникающие между различными телами. При моделировании контактного взаимодействия учитываются такие основные факторы, как обеспечение непроникновения тел друг в друга, а также возможные силы трения, возникающие между ними. Ранее в ПП ЛОГОС учет контактного взаимодействия при статическом деформировании был реализован для тел, аппроксимируемых объемными конечными элементами. В связи с развитием методов моделирования в оболочечном приближении возникла необходимость реализации методов учета контактного взаимодействия между телами, представленными с использованием оболочечных элементов.

Существуют разные подходы для определения величины контактного взаимодействия между телами. Для реализации в ПП ЛОГОС был выбран метод штрафных функций (Penalty Method), как наиболее надежный и универсальный. Кроме того, существуют различные алгоритмы для определения точек приложения контактных сил. К реализации в ПП ЛОГОС взят метод сегмент-в-сегмент, в котором контактные силы рассчитываются в точках интегрирования оболочечных элементов.



Рис. 4. Результирующее поле перемещений в задаче об учете контактного взаимодействия между цилиндрами, представленными оболочечными КЭ

На рис. 4 представлен результат решения статической задачи на учет контактного взаимодействия между двумя цилиндрами, моделируемыми в оболочечном приближении, демонстрирующий работоспособность реализации в ПП ЛОГОС.

Развитие методов моделирования конструкционных соединений при решении задач статической прочности

В машиностроении конструкции, состоящие из нескольких составных частей, соединяются специальными конструкционными соединениями. Поэтому одним из условий применимости пакета программ прочностного анализа к решению промышленных задач является наличие методов моделирования разнообразных конструкционных соединений.

Текущая версия пакета программ ЛОГОС обеспечивает следующий набор возможностей для моделирования конструкционных соединений, таких как: болтовые, заклепочные, шарнирные соединения, элементы жесткой связи RBE2 и RBE3, явно задаваемые многоточечные ограничения, и др. Методы расчета болтовых, заклепочных, шарнирных соединений добавлены к функциональным возможностям в 2016– 2018 гг.

Методология расчета болтового соединения с учетом преднатяга, реализованная в пакете программ ЛОГОС, основана на работах [7–8]. Каждая зона преднатяжения определяется двумя поверхностями и определяющим узлом, в котором задается направление и величина нагрузки, с помощью которой обеспечивается затяжка данного соединения. Определяющий узел связан с узлами поверхностей посредством автоматически формируемых многоточечных ограничений МРС (multi-point constraint), обеспечивающих, с одной стороны, связность сетки двух поверхностей преднатяга, а с другой, передающих усилие преднатяга на все узлы из зоны преднатяга.

Модель заклепочного соединения, введенная в пакет программ ЛОГОС, основана на работах [9-10]. Данная модель с одной стороны, описывает основные особенности деформирования данного соединения, а с другой является менее затратной с точки зрения ресурсов, чем прямое моделирование заклепочного соединения. Тело заклепки моделируется балочными элементами с характеристиками поперечного сечения (площадь, моменты инерции), соответствующими сечению данного крепежного элемента. Со всеми деталями стягиваемого данным крепежом пакета балочные элементы соединяются элементами жесткой связи. Данные элементы жесткой связи связывают степени свободы узла на теле заклепки со степенями свободы узлов деталей по периметру отверстия заклепки, обеспечивая тем самым условия совместности деформирования соединения.

Шарнирное соединение – кинематическая пара, то есть подвижное соединение двух частей конструкции, которое обеспечивает им вращательное и\или поступательное движение относительно друг друга. Моделирование шарнирных соединений в пакете программ ЛОГОС обеспечивается с помощью многоточечных ограничений, которые связывают между собой узел, лежащий на подвижной части конструкционного соединения с узлом, лежащим на его неподвижной части. Каждому типу шарнирного соединения соответствует индивидуальный набор уравнений связи, формирующих набор многоточечных ограничений. Поскольку в общем случае для таких многоточечных ограничений невозможно выразить одну из переменных через линейную комбинацию других переменных, учет многоточечных ограничений для шарнирных соединений в пакете программ ЛОГОС осуществляется с использованием метода множителей Лагранжа.

Результаты решения практических и методических задач по пакету программ ЛОГОС версии 2018 года

Приведенные в данном разделе примеры демонстрируют работоспособность представленных в докладе функциональных возможностей и их применимость к решению сложных практических задач.

Численное моделирование процесса статического деформирования квадратной композитной пластины под действием приложенного давления в геометрически нелинейной постановке

Решается задача статического деформирования квадратной композитной пластины под действием

приложенного давления в геометрически нелинейной постановке. Задача предназначена для демонстрации работоспособности методов и алгоритмов расчета многослойного композитного упругого материала, а также работоспособность оболочечного конечного элемента в геометрически нелинейной постановке.

Геометрические размеры: длина – 12 м, толщина оболочки: 0,096 м (вариант № 1); 0,3 м (вариант № 2).

Проведено 2 варианта расчета с использованием модели композитного материала:

 для варианта № 1, Композит А – состоит из 4 слоев [0/90/0/90];

 для варианта № 2, Композит Б – состоит из 6 слоев [0/90/0/90/0/90].

Физико-механические характеристики материала слоев приведены в таблице.

По контуру узлы пластины закреплены от перемещений по всем степеням свободы . К поверхности пластины приложено давление P = 2,4 Па (вариант № 1), P = 1800 Па (вариант № 2).

Конструкция разбивается регулярным образом по 16 элементов на сторону квадрата. Общее число конечных элементов 256.

На рис. 5 приведены графики зависимости величины прогиба в центре пластины в зависимости от приложенного давления по результатам расчетов задачи по ПП ЛОГОС для Композита-А (а) или для Композита-Б (б). Также приведен эталонный график зависимости [4].

ФИЗИКО-МСЛАНИЧЕСКИЕ	ларакі	сристики	материала слоя	

	Е₁, Па	<i>E</i> ₂ , Па	<i>G</i> ₁₂ , Па	G_{13}, Π a	<i>G</i> ₂₃ , Па	υ
вар. 1	$1,8282 \cdot 10^6$	$1,8348\cdot 10^6$	$0,3125 \cdot 10^6$	$0,3125 \cdot 10^6$	$0,3125\cdot 10^6$	0,2395
вар. 2	$40 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$0,6\cdot 10^6$	$0,6\cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$	0,25



Рис. 5. Графики зависимости величины прогиба в центре пластины от приложенного давления: а – для Композита-А, б – для Композита-Б



Рис. 6. Постановка задачи о деформировании панели из композитного материала



Рис. 7. Поле результирующих перемещений в задаче численного моделирования деформирования панели из композитного материала

Численное моделирование деформирования панели из композитного материала

В данной задаче проводится расчет характеристик статического деформирования типовой авиационной панели из композитного материала. Один конец панели закреплен, ко второму концу приложена сила (рис. 6).

На рис. 7 приведены результаты решения данной задачи, полученные по ЛОГОС, в виде распределения по конструкции величины результирующего перемещения.

Решение данной задачи показывает работоспособность реализованных функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части анализа прочности отдельных элементов авиационных конструкций.

Расчет характеристик нелинейного деформирования пассажирского самолета под действием нагрузок, имитирующих статические испытания

Численное моделирование процесса деформирования конструкции самолета проводилось с использованием высокодетализированной конечноэлементной модели самолета, включающей балочные элементы (силовой каркас, элементы шасси), оболочечные элементы (обшивка корпуса), элементы сплошной среды, а также спецэлементы для описания конструкционных соединений. Задача решалась в нелинейной постановке с учетом больших деформаций и перемещений.

Размерность матрицы СЛАУ составила 941 000 строк, общее время решения составило 74 минуты в многоядерном режиме на ПК.

Заданные в модели условия закрепления и нагружения соответствуют одному из видов статических испытаний, проводимых для оценки прочностных характеристик конструкции самолета.

На рис. 8 приведены результаты решения данной задачи, полученные по ЛОГОС, в виде распределения по конструкции величины результирующего перемещения.

Результаты решения данной задачи в полномасштабной постановке демонстрируют общую работоспособность новых функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части решения задач статической прочности.



Рис. 8. Результирующее поле перемещений в задаче расчета характеристик нелинейного деформирования пассажирского самолета

Заключение

В данной работе приведено описание основных подходов и алгоритмов, используемых в пакете программ ЛОГОС для решения задач статической прочности конструкций. Отдельно выделены функциональные возможности, реализованные разработчиками в 2017–2018 гг. и направленные на расширение области применимости данного пакета программ на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности. Работоспособность реализованного функционала показана на примерах решения практических задач деформирования элементов авиационных конструкций.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О. и др. Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС // Труды XV международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2014.

2. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2011.

3. Филимонкин Е.А., Барабанов Р.А., Дьянов Д.Ю., Спиридонов В. ., Циберев К. В., Наумов А. О., Косарим С. С., Александрова О. Л., Рябов А. А., Вяткин Ю. А., Речкин В. Н. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач статической прочности конструкций с учетом физической и геометрической нелинейностей // Сборник докладов XI научнотехнической конференции «Молодежь в науке» / секция «Теоретическая и математическая физика». Саров, 2012 г.

4. Yang JinSong, Xia PinQi. Finite element corotational formulation for geometric nonlinear analysis of thin shells with large rotation and small strain // Science China. Technological Sciences, 2012. N. 55(11). P. 3142–3152.

5. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности // М.: Физматлит, 2001.

6. Kojic M. and Bathe K.-J. Inelastic Analysis of Solids and Structures // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.

7. Hibbitt, Karlsson and Sorenson. Computer process for prescribing an assembly load to provide pretensioning simulation in the design analysis of loadbearing structures // United States Patent, patent number: 5.920.491, date of patent: Jul.6, 1999.

8. Fukuoka T., Analysis of the Tightening Process of Bolted Joint With a Tensioner Using String Elements, Journal of Pressure Vessel Technology. – 1994. – Vol. 116. – P. 443–448.

9. A. Rutman, J. B. Kogan. Multi-Spring Representation of Fasteners for MSC/NASTRAN Modeling. Proceedings of The First MSC Conference for Aerospace Users, Los Angeles, CA, 1997.

10. A novel finite element for modeling a fastener in a lap joint assembly. A dissertation by Brian D. Foster, 2014.

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДУЛЕ ЛОГОС-ТЕПЛО ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА МЕТАЛЛЫ

<u>Р. И. Карпова</u>, В. А. Глазунов

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

Введение

В последние два десятилетия всё больше внимания привлекает к себе обработка металлов с помощью короткоимпульсных лазеров. Они широко используются для прецизионной обработки широкого класса материалов (лазерная сварка, резка труднообрабатываемых материалов, гравировка, бурение глубоких отверстий малого диаметра и т. д.).

Специфика воздействия сверхкоротких импульсов на металлы состоит в том, что тепло не успевает далеко распространиться за пределы области взаимодействия. Кроме того абляция (удаление) вещества происходит не в виде капель расплавленного материала (как в случае использования наносекундных лазерных импульсов), а в виде пара и плазмы. Эти факторы увеличивают точность обработки с возможностью получения резких границ на субмикронном уровне. Одной из закономерностей импульсного воздействия является то, что чем короче длительность и выше интенсивность излучения, тем больше наблюдается аномалий и отклонений в поведении процессов, тем ограничениее возможности экспериментальных подходов и выше их стоимость. В этих ситуациях особую значимость приобретают теоретические представления на основе анализа и прогноза, осуществляемых методами математического моделирования [1].

Сложность моделирования заключается в том, что время воздействия, определяемое длительностью импульса, существенно меньше времени релаксации температуры от электронов к ионной решётке. Это не позволяет использовать традиционный подход однотемпературного приближения, и используются более сложные модели распространения тепла. Одним из подходов является использование двухтемпературного приближения, при котором раздельно вводят электронную и решеточную температуры.

Двухтемпературная модель теплопроводности

Уравнения сохранения энергии для двухтемпературной модели при отсутствии деформаций записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho E_e}{\partial t} = div \left(\chi_e \, grad \, T_e \right) - G(\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_l) + Q_T \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho E_l}{\partial t} = div \left(\chi_l \ grad \ T_l \right) + G(\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_l)$$
(2)

где:

ρ – плотность вещества;

E_e, *E_l* – внутренние удельные энергии электронов и решётки;

 χ_e , χ_l – коэффициенты теплопроводности электронов и решётки;

 T_{e} , T_{l} – температуры электронов и решётки;

G – коэффициент скорости обмена энергией электронов с решёткой;

 $G(T_e - T_l)$ – определяет энергию, получаемую решеткой от электронного газа в единице объема в единицу времени, т. е. имеет физический смысл теплового источника для решетки;

 Q_T – мощность, получаемая электронами в результате поглощения излучения, отнесенная к единице объема.

Численный метод решения

Для простоты, рассмотрим уравнение теплопроводности только для электронов. Для решётки все выкладки будут аналогичными. Проинтегрируем уравнение (1) по объему ячейки ΔV_P , ограниченной

поверхностью $\Sigma_P = \bigcup_{f=1}^F \Delta S_f$ и, используя формулу

Гаусса-Остроградского, запишем интегральный закон сохранения энергии:

$$\int_{\Delta V_P} \frac{\partial \rho E_e}{\partial t} dV - \oint_{\Sigma_P} \left(\chi_e \operatorname{grad} T_e \cdot \vec{n} \right) dS =$$

$$= \int_{\Delta V_P} Q dV - \int_{\Delta V_P} G(\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_l) dV$$
(3)

Используя квадратурные формулы, заменим интегральные выражения разностными. При интегрировании будем использовать теорему о среднем. Тогда уравнение (3) в полудискретном виде запишется так:

$$(\rho\Delta V)_{P} \left(\frac{\partial E_{e}}{\partial t}\right)_{P} - \sum_{f=1}^{F} \left(\chi_{e} \operatorname{grad} T_{e} \cdot \vec{n}\right)_{f} \Delta S_{f} =$$

$$= \left(Q\Delta V\right)_{P} - G(T_{e} - T_{l}) \left(\Delta V\right)_{P}$$
(4)

Для описания численных алгоритмов обозначим через $\Lambda(T)$ разностный оператор, аппроксимирующий потоки тепла через грани ячейки.

Аппроксимация производной по времени

Производную по времени будем аппроксимировать по следующей формуле:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\tau^n} \left(1 + \frac{\sigma \tau^n}{\tau^n + \tau^{n-1}} \right) \left(E^{n+1} - E^n \right) - \frac{\sigma \tau^n}{\tau^{n-1} \left(\tau^n + \tau^{n-1} \right)} \times (5) \times \left(E^n - E^{n-1} \right),$$

где параметр σ может принимать значения: $0 \le \sigma \le 1$. Для схемы первого порядка аппроксимации $\sigma = 0$. Для схемы второго порядка аппроксимации $\sigma = 1$.

Подставляя выражение для производной по времени (5) в (4) и аппроксимируя разностный оператор по верхнему временному слою, получим следующую неявную схему:

$$\frac{1}{\tau^{n}} \left(1 + \frac{\sigma \tau^{n}}{\tau^{n} + \tau^{n-1}} \right) (\rho \Delta V)_{P} \left((E_{e})_{P}^{n+1} - (E_{e})_{P}^{n} \right) - \Lambda(T_{e}^{n+1}) = \\
= (Q\Delta V)_{P} + \frac{\sigma \tau^{n} (\rho \Delta V)_{P}}{\tau^{n-1} (\tau^{n} + \tau^{n-1})} \times \\
\times \left((E_{e})_{P}^{n} - (E_{e})_{P}^{n-1} \right) - G \left((T_{e})_{P}^{n+1} - (T_{l})_{P}^{n+1} \right) (\Delta V)_{P},$$
(6)

Определение теплофизических свойств веществ

При расчете нелинейных задач, в которых теплофизические свойства веществ и граничные условия зависят от решения, численное решение на новом временном слое находится методом итераций по нелинейности. В этом методе, значения теплофизических свойств веществ, таких как коэффициент теплопроводности, определяются по температуре с предыдущей итерации γ . Значение E^{n+1} определяется с использованием линеаризации по Ньютону:

$$E^{n+1} = E^{\gamma+1} = E^{\gamma} + \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)^{\gamma} \left(T^{\gamma+1} - T^{\gamma}\right) =$$

$$= E^{\gamma} + \left(C_{p}\right)^{\gamma} \left(T^{\gamma+1} - T^{\gamma}\right)$$
(7)

Дельта-форма разностных уравнений

Будем искать решение на новом временном слое по неявной схеме методом итераций. Тогда разностное уравнение примет вид

$$\frac{1}{\tau^{n}} \left(1 + \frac{\sigma \tau^{n}}{\tau^{n} + \tau^{n-1}} \right) \left(\rho \Delta V \right)_{P} \left(\left(E_{e} \right)_{P}^{\gamma+1} - \left(E_{e} \right)_{P}^{n} \right) - \Lambda(T_{e}^{\gamma+1}) =$$

$$= \frac{\sigma(\rho \Delta V)_{P}}{\left(\tau^{n} + \tau^{n-1} \right)} \left(\frac{\tau^{n}}{\tau^{n-1}} \left(E_{e} \right)_{P}^{n} - \left(E_{e} \right)_{P}^{n-1} \right) - G\left(\left(T_{e} \right)_{P}^{\gamma} - \left(T_{l} \right)_{P}^{\gamma} \right) \times (8)$$

$$\times \left(\Delta V \right)_{P} + \left(Q \right)_{P}^{n} \left(\Delta V \right)_{P},$$

где γ – номер итерации.

Проводя линеаризацию приращения внутренней энергии по (7), получим:

$$E^{\gamma+1} - E^n = \left(C_p\right)^{\gamma} \Delta T + \left(E^{\gamma} - E^n\right) \tag{9}$$

где

$$\Delta T = T^{\gamma+1} - T^{\gamma} \tag{10}$$

Линеаризация потоков тепла приводит к выражению:

$$\Lambda(T^{\gamma+1}) = \Lambda(T^{\gamma+1}) - \Lambda(T^{\gamma}) + \Lambda(T^{\gamma}) = \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T + \Lambda(T^{\gamma}), (11)$$

где

$$\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T = \sum_{f=1}^{F} \left(\left(\chi \, grad \Delta T \right) \cdot \vec{n} \right)_{f} \, \Delta S_{f}$$
(12)

С учетом (9)–(11) разностное уравнение (8) примет вид:

$$\frac{1}{\tau^{n}} \left(1 + \frac{\sigma\tau^{n}}{\tau^{n} + \tau^{n-1}} \right) (\rho \Delta V)_{P} (C_{e})_{P}^{\gamma} \Delta T_{eP} - \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T_{e}} \right)^{\gamma} \Delta T_{eP} = \\
= \Lambda (T_{e}^{\gamma}) - G \left((T_{e})_{P}^{\gamma} - (T_{l})_{P}^{\gamma} \right) (\Delta V)_{P} - \\
- \frac{1}{\tau^{n}} \left\{ \left(1 + \frac{\sigma\tau^{n}}{\tau^{n} + \tau^{n-1}} \right) \left((E_{e})_{P}^{\gamma} - (E_{e})_{P}^{n} \right) - \frac{\sigma\tau^{n}}{(\tau^{n} + \tau^{n-1})} \times \right. \right. \tag{13}$$

$$\times \left\{ \frac{\tau^{n}}{\tau^{n-1}} (E_{e})_{P}^{n} - (E_{e})_{P}^{n-1} \right\} \left(\rho \Delta V \right)_{P} + (Q)_{P}^{n} (\Delta V)_{P} + \\$$

Это так называемая дельта-форма разностных уравнений, в которой искомым решением является приращение температуры в ячейках разностной сетки, а правая часть разностных уравнений является невязкой, то есть погрешностью разностной аппроксимации уравнения баланса энергии.

Численное решение тестовых задач

Проверку реализованной двухтемпературной модели теплопроводности будем осуществлять на задачах, имеющих известное решение. В работах [2-3] описано численное решение задачи короткоимпульсного воздействия на тонкие металлические плёнки. Все приведенные ниже примеры имеют сходные постановки. Отличие состоит в облучаемом металле (золото, медь, титан, вольфрам), мощности и длительности воздействия. Поэтому приведём общую постановку задачи и описание математической модели. Значения теплофизических характеристик, энергии излучения, времени воздействия и полученные результаты будут приведены для каждого эксперимента в соответствующем подразделе.

<u>Постановка задачи</u>

Рассматривается задача теплопроводности в тонкой металлической плёнке толщиной L (рис. 1). Фронтальная поверхность плёнки (z = 0) облучается ультракоротким лазерным импульсом длительностью т.



Рис. 1. Постановка задачи

Начальная температура электронов и решётки выбиралась равной 300 К:

$$T_e(t=0) = T_l(t=0) = 300$$

Так как длительность лазерного импульса невелика, теплообменом плёнки с окружающей средой можно пренебречь. Таким образом, для ионной температуры получаем граничное условие в виде:

q = 0

Теплоемкость и теплопроводность электронов рассчитываются по следующим формулам:

$$C_e = C_{e_0} \times T_e$$

$$K_e = K_{e_0} \times \frac{T_e}{T_1}$$

Здесь C_{e_0} – коэффициент для теплоёмкости электронов, K_{e_0} – коэффициент для электронной тепло-

проводности. Скорость электрон-решёточной релаксации является постоянной величиной.

Расчётная модель

При численном моделировании будем рассматривать фрагмент тонкой плёнки толщиной 100 нм. Для случая тонких металлических плёнок диаметр пятна облучения намного больше характерной глубины, на которой идут активные процессы, стимулированные лазерным облучением. Исходя из этого, нагрев носит существенно одномерный характер (в направлении оси Z), и размеры области (по осям X, Y) не оказывают влияния на прогрев. Область моделирования показана на рис. 2.



Рис. 2. Расчётная область

При численном моделировании будем рассматривать структурированную расчётную сетку, показанную на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид расчетной сетки

Ниже приведём результаты численного моделирования воздействия в модуле ЛОГОС-ТЕПЛО и их сравнение с решением, приведённым в работах [2–3]. Относительное отклонение решения в ЛОГОС-ТЕПЛО от результатов, приведённых в работах [2–3] будем определять по формуле:

$$\delta = \frac{|T_{LGS} - T_{ET}|}{|T_{ET}^{\max} - T_{ET}^{\min}|} \cdot 100 \%,$$

где T_{LGS} – значение величины, подсчитанной с помощью модуля ЛОГОС-ТЕПЛО, T_{ET} – значение величины из работ [2–3], T_{ET}^{\max} – максимальное значение величины из работ [2–3], T_{ET}^{\min} – минимальное значение величины из работ [2–3].

Нагрев золотой плёнки импульсом длительностью 200 фс

Рассмотрим первую задачу – нагрев тонкой золотой плёнки импульсом длительностью 200 фс.

Для металлов ослабление лазерного излучения при его распространении вглубь вещества описывается в соответствие с законом Ламберта – Бэра. Импульсы излучения лазера ультракороткой длительности хорошо аппроксимируются гауссовой зависимостью от времени.

В данной задаче функция источника нагрева имела следующий вид (рис. 4.):

$$Q(z,t) = \frac{2I(1-R)\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \cdot \tau} \exp\left(-4\ln 2 \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right) \times \frac{e^{-z/\lambda_0}}{\lambda_0 \left(1 - e^{-d/\lambda_0}\right)}$$

Здесь I – плотность потока лазерного излучения, τ – длительность импульса, R – коэффициент отражения, d – толщина плёнки, λ_0 – глубина оптического поглощения.



Рис. 4. График функции источника нагрева из работы [2]

Плёнка облучалась лазерным импульсом длительностью $\tau = 200 \ \phi c \ c$ плотностью потока лазерного излучения $I = 450 \ \text{Дж}/\text{м}^2$. Вклад теплопроводности решётки в перенос тепла в плёнке не учитывался, так как на временах до нескольких десятков пикосекунд он пренебрежимо мал по сравнению со вкладом электронов. На рис. 5. приведены графики зависимости температуры электронов и решетки от времени в центральной ячейке на облучаемой границе пленки.



Рис. 5. График температур электронов и ионов

По итогам тестового расчета можно сделать вывод, что динамика нагрева электронов и ионной решётки из статьи и в расчёте ЛОГОС-ТЕПЛО имеет качественно одинаковый характер. Из численных значений в таблице и из рисунка, можно видеть, что время электрон-решёточной релаксации и температура решётки визуально совпадают. Наблюдается небольшое различие в температуре электронов и в установившейся температуре, не превышающее 0,5 %.

Нагрев золотой плёнки импульсом длительностью 100 фс

Рассмотрим вторую задачу нагрева тонкой золотой плёнки. В ней функция источника нагрева задавалась следующим образом:

$$Q(z,t) = \frac{2I(1-R)\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \cdot \tau} \exp\left(-4\ln 2 \cdot \left(\frac{t-2\tau}{\tau}\right)^2\right) \frac{e^{-z/\lambda_0}}{\lambda_0}$$

График функции источника представлен на рис. 6.



Рис. 6. График функции источника из работы [3]

Продолжительность лазерного импульса составляла $\tau = 100 \, \text{фc}$, плотностью потока лазерного излучения $I = 10 \, \text{Дж}/\text{м}^2$. Так же учитывался вклад теплопроводности решётки в перенос тепла в плёнке $(K_L = \text{const})$. Остальные параметры остались такими же, как и в 1 задаче. На рис. 7. приведены графики

зависимости температуры электронов от времени в центральной ячейке на облучаемой границе пленки.



Рис. 7. График температуры электронов

Полученные в ЛОГОС результаты демонстрируют качественное и количественное совпадение с результатами, приведёнными в статье. Динамика нагрева и максимальная температура имеют незначительные отличия.

Однако следует отметить, что при остывании электронов в решении внешнего источника на момент времени ~ 0,5 пс наблюдается эффект обратного нагрева электронов, повторить который в ЛОГОС не удалось. При этом изучение статьи, использованной там модели и постановки численного эксперимента не дало ответ на вопрос наличия данного расхождения. Возможно, этот эффект обусловлен теплофизическими характеристиками материала и требует дополнительного исследования.

Нагрев тонкой медной плёнки ультракоротким лазерным импульсом

Рассмотрим задачу нагрева тонкой медной плёнки. Постановка задачи в данном случае полностью аналогична описанной выше задаче. На рис. 8. приведены графики зависимости температуры электронов от времени в центральной ячейке на облучаемой границе пленки.



Рис. 8. График температуры электронов

Полученные результаты демонстрируют хорошее качественное и количественное совпадение с результатами из внешнего источника. Максимальное относительное отклонение не превышает 1,7 %.

Нагрев тонкой титановой плёнки ультракоротким лазерным импульсом

Рассмотрим задачу нагрева тонкой титановой плёнки. Постановка задачи аналогична описанной выше задаче. На рис. 9. приведены графики зависимости температуры электронов и решетки от времени в центральной ячейке на облучаемой границе пленки.



Рис. 9. График температур электронов и решётки

Полученные в ЛОГОС результаты по динамике нагрева электронов и ионной решётки показывают хорошее качественное совпадение. При этом максимальное относительное отклонение для максимальной и установившейся температур составляет 7,7 %.

На рис. 10 представлены профили распределения температуры электронов по толщине плёнки на различные моменты времени.



Рис. 10. Распределение температуры электронов вдоль оси Z на различные моменты времени

Из графиков видно, что в целом процесс распространения тепла в ЛОГОС имеет тот же характер, что и в использованном источнике. Различия наблюдаются на переходном этапе, в момент достижения пика лазерного излучения (кривые на моменты времени 0,2 пс и 0,3 пс).

Нагрев тонкой плёнки из вольфрама ультракоротким лазерным импульсом

Рассмотрим задачу нагрева тонкой плёнки из вольфрама. Постановка задачи аналогична описанной выше задаче. На рис. 11 приведены графики зависимости температуры электронов и решетки от времени в центральной ячейке на облучаемой границе пленки.



Рис. 11. График температуры электронов и решётки

Максимальная погрешность анализируемых величин оказалась равной 6,6 %.

На рис. 12 показаны профили распределения температуры электронов по толщине плёнки на различные моменты времени.



Рис. 12. Распределение температуры электронов вдоль оси Z на различные моменты времени

Как и при нагреве титановой плёнки в предыдущем примере, характер нагрева, процесс распространения температуры, полученные в ЛОГОС-ТЕПЛО и во внешнем источнике демонстрируют хорошее качественное и количественное совпадение.

Была исследована сходимость решения при уточнении сеточной дискретизации на примере задачи нагрева плёнки из вольфрама. На рис. 13 приведены графики зависимости температуры электронов от времени вблизи облучаемой границы пленки из вольфрама.



Рис. 13. Сходимость решения при уточнении сеточной дискретизации

Проверка на сходимость, показала, что при изменении количества слоев расчетной сетки по толщине плёнки решение сходится к точному.

Так же было произведено исследование решения по временной переменной на примере задачи нагрева плёнки из вольфрама. На рис. 14 приведены графики зависимости температуры электронов от времени вблизи облучаемой границы пленки из вольфрама.



Рис. 14. Сходимость решения при уменьшении шага по времени

Проверка на сходимости показала, что при измельчении шага по времени решение сходится к точному.

Было произведено сравнительное моделирование 1Т и 2Т моделей. На рис. 15 приведены графики зависимости температуры электронов от времени вблизи облучаемой границы пленки из вольфрама.

Данный пример показывает, что если длительность лазерных импульсов меньше, чем время установления теплового равновесия между электронами и ионами, то решение для изменения температуры в металле необходимо искать, используя двухтемпературную модель.



Рис. 15. Сравнение однотемпературной и двухтемпературной моделей

Однотемпературный подход в данном случае показал плохое качественное и количественное совпадение, относительное отклонение максимальной температуры электронов и установившейся температуры от численного решения, приведённого во внешнем источнике, составило более 64 %.

Заключение

В результате проведённой работы выполнена разработка и реализация в модуле ЛОГОС-ТЕПЛО численного метода решения задач нагрева тонких металлических плёнок ультракоротким лазерным импульсом. Была выполнена проверка разработанной модели на примере решения тестовых задач в различных постановках, имеюших численное решение. Сравнение результатов расчета с результатами из внешних источников показало хорошее качественное и количественное совпадение. Было проведено исследование сходимости решения по времени и по пространству, результаты которого показали, что с уменьшением шага по времени и при уточнении сеточной дискретизации наблюдается сходимость численного решения к решению из внешних источников. Было проведено сравнительное моделирование нагрева плёнки ультракоротким импульсом с помощью однотемпературной и двухтемпературной моделей. Однотемпературный подход продемонстрировал свою неприменимость в ланных залачах.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная двухтемпературная модель сохраняет достаточную точность решения и может быть применима в реальных задачах.

Литература

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009.

2. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009.

3. Wellershoff S.-S., Hohlfeld J. The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals // Appl. Phys. A / Digital Object Identifier (DOI) 10.1007, 1999.

ВИРТУАЛЬНЫЙ 3D-ПРИНТЕР. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

<u>М. В. Медведкина,</u> Д. Ю. Дьянов, К. В. Циберев, А. Н. Быков, В. В. Попов

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

Введение

В настоящее время ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» участвует в работах в интересах создания базовой версии программного обеспечения для моделирования процессов селективного лазерного плавления и сопутствующих проблем: виртуальный 3D-принтер. Одна из программных компонент виртуального 3D-принтера позволяет проводить топологическую оптимизацию деталей и генерировать различные типы ячеистых структур для заполнения объёма деталей.

Топологическая оптимизация является математическим подходом, решающим проблему оптимального распределения материала в ограниченном пространстве, с учетом действующих нагрузок и граничных условий. Данный вид оптимизации используется на стадии разработки первоначального вида конструкции. Полученное оптимальное решение затем модифицируется и «доводится» с учетом функциональных и технологических требований. Это позволяет сэкономить время на первоначальном этапе проектирования. Следует отметить, что полученные результате оптимизации конструкции, хотя и являются оптимальными, могут быть слишком дороги или сложны в производстве. Фактически, в основном, оптимизация сводится к уменьшению веса конструкции путём удаления, наименее вовлеченного в работу материала [1-3].

В данной работе приводятся подходы и алгоритмы, разработанные в интересах использования в базовой версии программного обеспечения «Виртуальный 3D-принтер» для нахождения новых топологий конструкций.

Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованных функциональных возможностей по моделированию оптимальной топологии в докладе представлены результаты численного расчета задач. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями.

Лазерные аддитивные технологии

В настоящее время передовые промышленные страны активно развивают и внедряют в производство лазерные аддитивные технологии изготовления

различных деталей. Сутью лазерных аддитивных технологий является послойное создание деталей путем спекания металлических порошков при воздействии лазерного излучения. Для промышленности интерес представляют разновидности данных технологий, связанные с изготовлением деталей из порошков различных металлов и сплавов с использованием лазерного излучения – селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление, электронно-лучевое плавление, прямая наплавка металла. Лазерные аддитивные технологии характеризуются большим количеством протекающих сложных физико-химических процессов и технологических параметров, что препятствует их широкому внедрению и затрудняет изготовление высококачественных деталей ввиду сложности подбора и отладки режимов технологического оборудования. В настоящее время экспериментальный подбор параметров приводит к существенным временным и материальным затратам при постановке деталей на производство – технологи методом проб и ошибок месяцами подбирают и отрабатывают режимы изготовления конкретных деталей, а производители оборудования привязывают технологические режимы работы оборудования к конкретным порошкам и изготавливаемым изделиям. Это является одним из существенных недостатков лазерных аддитивных технологий и тормозит их внедрение в производство.

В последние десятилетия в связи с развитием математических моделей, численных методов, программ и вычислительной техники, вопросы оптимизации протекающих физических процессов посредством выбора параметров работы технологического оборудования решаются с помощью математического моделирования. Большое количество и высокий уровень научных работ, посвященных этим вопросам в области лазерных аддитивных технологий за последнее время, привели к созданию первых версий импортного специализированного программного обеспечения, позволяющего смоделировать физические процессы при изготовлении деталей и выбрать основные параметры работы технологического оборудования. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» участвует в работах в интересах создания базовой версии отечественного программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер», предназначенного для прогнозирования результатов 3D-печати. Данный программный комплекс позволяет имитировать процесс послойного построения детали, а так же выбрать оптимальные параметры работы оборудования, своевременно выявлять и устранять возможные ошибки. Важной является возможность получить виртуальную модель конечного изделия, для которой расчетным путем с учётом особенностей выбранного оборудования и его работы определены, прежде всего, механические свойства материалов, деформации и остаточные напряжения.

Генеративный дизайн с использованием топологической оптимизации

Одним из преимуществ аддитивных технологий является свобода конструктора, при проектировании деталей, от технологических ограничений традиционных способов производства. В связи с этим, огромный практический интерес в области аддитивных технологий представляет создание деталей сложных форм посредством генеративного дизайна с использованием топологической оптимизации и решётчатых структур, что позволяет более эффективно использовать материал, создавать облегченные конструкции, уменьшать время изготовления деталей. Для создания компьютерных моделей таких топологически оптимизированных деталей необходимо иметь программное обеспечение, включающее в себя модуль расчета топологической оптимизации (ТопОпт) формы деталей. Модуль топологической оптимизашии является одним из основных компонент планируемого отечественного программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер».

В модуле ТопОпт в настоящее время реализован расчёт двумерных и трёхмерных задач топологической оптимизации методами ESO, BESO, PTO, SIMP [1, 3] на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции.

Метод BESO (bi-directional evolutionary structural optimization) построен на основе алгоритма эволюционной оптимизации конструкций. BESO метод [4, 5] позволяет материалу быть удаленным и добавленным одновременно. Родоначальником метода BESO являются Y ang и др. [6]. В их работах величина чувствительности неактивных элементов оценена посредством линейной экстраполяции смещения конечно элементного анализа. Элементы сплошной среды с самой низкой чувствительностью удаляются из структуры, а недействительные элементы с самой высокой чувствительностью снова добавляются в расчет.

Методы SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [3, 7] и РТО (Proportional Topology Optimization) [8] реализованы на основе критерия оптимальности и являются наиболее фундаментальными по сравнению с другими математическими методами, и впервые были введены для решения задач структурного дизайна Прагером [9]. В этих методах проектные переменные в элементах пропорциональны значению целевой функции. Элементы в конечно-элементной модели удаляются и добавляются в соответствии с критерием оптимальности [10].

Метод топологической оптимизации BESO с ограничениями целевой функции по смещениям

В данном разделе кратко изложен метод BESO [1, 4, 11] для решения задач топологической оптимизации линейных статических задач прочности с ограничениями целевой функции по смещениям. В данном методе целевой функцией является податливость системы, а условия по смещению и объему рассматриваются как ограничения целевой функции.

Постановку задачи топологической оптимизации для модифицированного метода BESO с дополнительным ограничением по смещению $u_A \leq u_A^*$ можно записать в следующем виде:

Минимизировать
$$C = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u}$$

Ограничения $u_j \le u_j^*$ (1)

$$V^* - \sum_{i=1}^N V_i x_i = 0$$

$$x_i = x_{\min}$$
или 1

Здесь, **К** – глобальная матрица жесткости, **u** – вектор смещения, u_j и u_j^* определяют амплитуду смещения *j*-го узла. V_i – объем *i*-го элемента, а V^* – конечный объем который мы хотим достигнуть в процессе оптимизации. Переменная фиктивной плотности x_i принимает от минимального значения до единицы.

Число Чувствительности

Принимая во внимание, что фиктивная плотность в нашем подходе записывается в виде диапазона от минимального числа до единицы, запишем модуль упругости Юнга согласно модифицированному SIMP методу:

$$E(x_i) = E_1 x_i^p, \qquad (2)$$

где E_1 – обозначает модуль Юнга материала, а p – показатель степени отбраковки. Предполагая, что коэффициент Пуассона не зависит от фиктивной плотности, а глобальная матрица жесткости **K** может быть выражена через элементную матрицу жесткости и переменные расчета x_i как:

$$\mathbf{K}^{0} = \sum_{i} x_{i}^{p} \mathbf{K}_{i}^{0}, \qquad (3)$$

где \mathbf{K}^0 обозначает элементную матрицу жесткости элемента.

Для удовлетворения условия ограничения по смещениям необходимо модифицировать функцию Лагранжа, введя соответствующие множители Лагранжа. Измененная целевая функция Лагранжа для ограничения по смещению может быть записана в виде:

$$f_1(x) = \frac{1}{2} \mathbf{f}^T \mathbf{u} + \lambda \left(u_j - u_j^* \right) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} + \lambda \left(u_j - u_j^* \right).$$
(4)

Измененная целевая функция эквивалентна начальной, если смещение равно величине его ограничения. Множитель Лагранжа $\lambda = 0$, если $u_j \leq u_j^*$, что означает удовлетворение ограничения по смещению. Множитель Лагранжа λ стремиться к бесконечности, если $u_j > u_j^*$, то мы пытаемся минимизировать смещение u_j , чтобы выполнить ограничение по смещению.

Чувствительность измененной целевой функции может быть найдена как:

$$\frac{df_1(\mathbf{x})}{dx_i} = px_i^{p-1} \left(-\frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i - \lambda \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i \right).$$
(5)

Соответственно, число чувствительности для элемента, *a_i* может быть определено как:

$$a_i = -\frac{1}{p} \frac{df_1(\mathbf{x})}{dx_i} = x_i^{p-i} \left(\frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i + \lambda \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i \right).$$
(6)

Здесь, \mathbf{u}_{ij} – вектор виртуальных перемещений, полученный в результате приложения фиктивной единичной нагрузки в контролируемом по смещению узле и отсутствию всех других нагрузок.

В результате числа чувствительности для элементов могут быть явно выражены соотношением:

$$a_i = \begin{cases} \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i & x_i = 1\\ x_{\min}^{p-1} & \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{K}_i^0 \mathbf{u}_i & x_i = x_{\min} \end{cases}.$$
 (7)

Определение множителя Лагранжа

Для нахождения числа чувствительности необходимо знать множитель Лагранжа. Соответствующее значение λ может быть определено через удовлетворение условий по объему и смещению.

Для простоты осуществления вычисления λ определяется как

$$\lambda = \frac{1 - \omega}{\omega} \tag{8}$$

где ω – константа в пределах от ω_{min} до 1, например от 10^{-10} до 1.

Чтобы найти соответствующее значение *w*, начальный диапазон значений *w* определяется как $\omega_{lower} = \omega_{min}$ и $\omega_{upper} = 1$. Программа начинается с начального значения $\omega = 1$, число чувствительности определяется согласно уравнениям (7) и (8).

Тогда смещение на следующей итерации u_j^{k+1} может быть оценено, исходя из уравнения:

$$u_j^{k+1} \approx u_j^k + \sum_i \frac{du_i^k}{dx_i} \Delta x_i$$

Далее анализируя получившееся смещение. Если $u_j^{k+1} > u_j^*$ мы обновляем *w* с меньшим значением следующим образом:

$$\hat{\omega} = \frac{\omega + \omega_{lower}}{2},\tag{9}$$

в то же самое время, мы перемещаем верхнюю границу ω так, чтобы $\omega_{upper} = \omega$.

С другой стороны, если $u_j^{k+1} < u_j^*$, мы обновляем *w* с большим значением следующим образом:

$$\hat{\omega} = \frac{\omega + \omega_{upper}}{2}, \qquad (10)$$

а нижнюю границу *w* обновляем так, чтобы $\omega_{lower} = \omega$. С обновленным $w = \hat{w}$, повторяем вышеупомянутую процедуру, до тех пор, пока, например $(\omega_{upper} - \omega_{lower}) > 10^{-5}/.$

Общий алгоритм решения задачи оптимизации BESO методом с ограничением по перемещению

Процесс топологической оптимизации может быть формализован в следующие шаги:

1. Разбиение исследуемой области на конечные элементы. Задание начальных и граничных условий.

2. Определение параметров оптимизации.

3. Выполнение конечно элементного анализа для реальной структуры и виртуальной структуры (структура находящееся под действием единичных виртуальных сил). Вычисление данных для нахождения чисел чувствительности.

 Определение целевого объема для следующей итерации.

5. Вычисление множителей Лагранжа.

6. Работа алгоритма фильтрации.

7. Обновление проектных переменных.

8. Повторение шагов 3-7 до полной сходимости результатов.

Метод топологической оптимизации РТО с ограничениями целевой функции по напряжению

Метод РТО [12] основан на критерии оптимальности. Основная идея метода заключается в использовании в качестве проектного параметра величины пропорциональной напряжению или податливости.

Задача с ограничением по напряжению

Задача топологической оптимизации с ограничением по напряжению – это задача минимизации объема, удовлетворяющая ограничению по напряжениям, и может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \min \sum_{i}^{N} \rho_{i} v_{i} \\ \mathbf{K} \mathbf{u} = f \\ \sigma_{i} \leq \sigma_{1} \text{ если } \rho > 0 \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_{i} \leq \rho_{\max} \leq 1 \end{cases}$$
(11)

где N – количество элементов, р – фиктивная плотность (переменная расчета), ρ_i – элементная фиктивная плотность, v_i – объем элемента, К – матрица жесткости, **u** – вектор смещения, *f* – вектор внешней силы, σ_i – напряжение в элементе (рассматривается эквивалентное напряжение по Мизесу), σ_1 – предельное значение по напряжению, ρ_{min} – нижняя граница плотности в элементе, и $\rho_{max}\,$ – верхняя граница плотности в элементе. Ограничения для фиктивной плотности [ρ_{min} , 1], где $\rho_{min} = 0,001$ [13] для устранения вырожденности матрицы жесткости [14]. Хотя задача записана как минимизация полной массы, мы подразумеваем минимизацию объема, т. к. данный алгоритм не использует инерционные характеристики тел. Нулевой объем говорит об отсутствии материала, в то время как равный 1 говорит о принадлежности элемента к области. Задача о напряжении с точки зрения теории линейного программирования является невыпуклой и существенно нелинейной [13].

Алгоритм РТО с ограничением по напряжению

Целевое количество материала может перераспределяться многократно. Для выполнения перераспределения материала, алгоритм входит во внутренний цикл. Распределение проводится пропорционально значению элементного напряжения

$$\rho_i^{opt} = \frac{RM}{\sum_{i}^{N} \sigma_i^q v_i} \sigma_i^q , \qquad (12)$$

где RM – конечное количество материала, N – количество элементов, ρ_i^{opt} – оптимальная элементная плотность, σ_i – мера напряжения в элементе, v_j – элементный объем, и q – степень пропорциональности.

Заключительный шаг главного цикла обновляет плотность в элементах, линейно суммируя элементную плотность с предыдущей итерации и оптимизированную на текущей итерации. Схема обновления имеет вид

$$\rho_i^{new} = \alpha \rho_i^{prev} + (1 - \alpha) \rho_i^{opt}, \qquad (13)$$

здесь ρ_i – элементная плотность, ρ^{new} – новая элементная плотность, которая передается на следующую итерацию, ρ^{prev} – элементная плотность на предыдущей итерации, ρ_i^{opt} – оптимизированная элементная плотность на текущей итерации, и α – временной коэффициент. Данный алгоритм обновления плотности служит для стабилизации фиктивной плотности. Обычно параметр α берется равным 0,5.

Как правило, за основу берется модифицированный метод SIMP [15]:

$$E(\rho) = E_{\min} + \rho^p E_0, \qquad (14)$$

где E – модуль Юнга, E_{\min} – минимальное значение для модуля Юнга (обычно 10^{-9}), принимаемое недействительными элементами, чтобы избежать вырожденной матрицы жесткости, E_0 – начальный модуль Юнга, и *р* коэффициент отбраковки (обычно принимается равным 3) [15].

Ограничение по напряжению

Метод РТО ограничивает максимальное значение функции напряжения следующим образом:

$$\max\left\{\sigma_{i}\right\} \leq \sigma_{elastic\,\lim it},\qquad(15)$$

где σ_i – напряжение по Мизесу в *i*-ом элементе (напряжение по Мизесу вычисляется в геометрическом центре элемента). Ограничение по напряжению влечет за собой тот факт, что напряжение не превышает предела упругости в любом элементе системы. Таким образом, ограничение обеспечивает жесткий контроль максимума функции напряжения.

Фильтрование плотности

В методе РТО для борьбы с эффектом «шахматной доски» (рис. 1) используется алгоритм фильтрования фиктивной плотности.



Рис. 1. Образец вида «шахматная доска»

В работе Bruns [16], простое фильтрование плотности представлено как

$$\rho_{i} = \frac{\sum w_{ij} d_{j}}{\sum w_{ij}} \quad \text{где} \quad w_{ij} = \begin{cases} \frac{r_{0} r_{ij}}{r_{0}} \text{ для } r_{ij} < r_{0} \\ 0 \text{ для } r_{ij} \ge r_{0} \end{cases}, \quad (16)$$

 ρ_i – отфильтрованная плотность элемента *i*, w_{ij} – отфильтрованный вес элементов *i* и *j*, d_j – нефильтрованная плотность элемента *j*, r_{ij} – расстояние между элементами *i* и *j*, и r_0 – область фильтрации. Вес обратно пропорционален расстоянию между элементом и его соседями.

В этом смысле, фактически фильтрование плотности – это местное усреднение. Кроме того, сохраняется объем. Фильтрование необходимо для достижения следующих преимуществ:

1. Предотвращение мелкомасштабных особенностей топологии, таких как зазубренные края, узкие элементы, и острые поверхности раздела [17].

2. В результате получается сглаженная область вокруг структурных элементов [17].

3. Алгоритм спасает от «застревания» в местных минимумах [17].

4. Предотвращает появления топологии вида «шахматной доски» [18].

5. Налагает ограничение на минимальный характерный радиус взаимодействия элементов в расчете [18].

Вычисление напряжения

Как установлено ранее, напряжение по Мизесу измеряется в геометрическом центре элементов. Напряжение по Мизесу для двумерного случая имеет вид

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\sigma_{xy}^2} , \qquad (17)$$

Вычисление тензора напряжения можно записать в следующем виде

$$\sigma = \mathbf{DBu},\tag{18}$$

где **D** – определяющая матрица, **B** – матрица производной функции формы, и **u** – вектор смещения. Определяющая матрица для плосконапряженного состояния определяется соотношением

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1 - v^2} \begin{bmatrix} 1 & v & 0 \\ v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - v)/2 \end{bmatrix},$$
(19)

где E – модуль Юнга и v – коэффициент Пуассона. Поскольку данная линейная форма справедлива для билинейного квадратного элемента, **B** имеет вид

$$\boldsymbol{B} = \frac{1}{2L} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix},$$
(20)

u – вектор смещения элемента.

Общий алгоритм решения задачи оптимизации РТО методом с ограничением по напряжению

Процесс топологической оптимизации может быть формализован в следующие шаги:

1. Разбиение исследуемой области на конечные элементы. Задание начальных и граничных условий.

- 2. Определение параметров оптимизации.
- 3. Выполнение конечно элементного анализа.
- 4. Проверка условия сходимости.
- 5. Оптимизационный процесс:

5.1. Определение текущего количества материала на итерации.

5.2. Распределение материала по объему. Проверка текущего максимального напряжения и вычисление объема перераспределяемого материала.

5.3. Перераспределение материала:

5.3.1. Распределение материала пропорционально уровню напряжения.

5.3.2. Применение фильтров.

5.3.3. Применение ограничений на фиктивную плотность.

5.3.4. Вычисление количества материала, необходимого для перераспределения.

5.3.5. Повторение 5.3.1.–5.3.5. до тех пор, пока есть что перераспределять.

6. Обновление проектных переменных.

7. Повторение шагов 3–7 до полной сходимости результатов.

Результаты некоторых демонстрационных расчётов

В данном разделе приведены результаты некоторых демонстрационных задач, которые показывают работоспособность и функциональные возможности программы решения задач методами топологической оптимизации.

Численное моделирование плоской задачи оптимизации методом BESO с учетом ограничения по перемещению

Необходимо определить оптимальную топологию задачи, геометрия которой дана на рис. 2, с учетом ограничения по перемещению в узле А. Снизу деталь шарнирно-оперта, сила P приложена к центральному элементу верхнего торца.



Рис. 2. Начальная геометрия задачи

Параметры нагружения: *P* = 1000 H – нагрузка, приложенная к центральному элементу верхнего торца.

В расчете используется модель упругого материала. В табл. 1 даны физико-механические характеристики.

Таблица 1

Физико-механические характеристики

Параметр	Описание	Значение
ρ, кг/мм ³	Начальная плотность	$2,7.10^{-6}$
Е, ГПа	Модуль Юнга	1
ν	Коэффициент Пуассона	0.3

В табл. 2 приведены параметры топологической оптимизации, используемые в расчете.

Таблица 2

Параметры топологической оптимизации метод BESO

Параметр	Описание	Значение
ER, %	Коэффициент отношения объемов на шаге k и k+1	2
r_{\min} , мм	Радиус чувствительности	1,5
p	Параметр отбраковки	3
V/V ₀ , %	Отношение конечного объе- ма к начальному	30
и, мм	Ограничение на перемещение в узле А	1,4, 1,2, 1

На рис. 3 приведены результаты расчета задачи, полученные методом топологической оптимизации BESO с учетом ограничения по перемещению в сравнении с [1, 11]



Рис. 3. Результаты, полученные BESO методом в сравнении с результатами, представленными в [1, 11], с ограничениями по перемещению: а – 1,4 мм; b – 1,2 мм; с – 1 мм Численное моделирование плоской задачи оптимизации консольной балки методом РТО с учетом ограничения по напряжению

Необходимо определить оптимальную топологию задачи, геометрия которой дана на рис. 4, с учетом ограничения по напряжению. Скобка жестко заделана по верхнему торцу, сила, направленная по нормали, приложена к вершине правого края.



Рис. 4. Начальная геометрия задачи

Параметры нагружения: P = 1 H – нагрузка, приложенная к центральному элементу верхнего торца.

Стоит отметить, что нагрузка прикладывается сразу к трем узлам.

В расчете используется модель упругого материала. В табл. 3 даны физико-механические характеристики.

Таблица 3

Физико-механические характеристики

Параметр	Описание	Значение
ρ, кг/мм ³	Начальная плотность	$2,7.10^{-6}$
<i>Е</i> , ГПа	Модуль Юнга	1
N	Коэффициент Пуассона	0,3

В табл. 4 приведены параметры топологической оптимизации, используемые в расчете.

Таблица 4

Параметры топологической оптимизации для метода РТО с ограничением по напряжению

Параметр	Описание	Значение
$E_{\min}, \Pi a$	Минимальный модуль Юнга	1.10^{-9}
Р	Параметр отбраковки	3
r _{min} , MM	радиус чувствительности	1,5
V/V ₀ , %	Отношение конечного объема к начальному	35
σ _{lim} , MΠa	Значение ограничения напряже- ния по Мизесу	1,08

На рис. 5 приведены результаты расчета задачи консольной баки, полученные методом топологической оптимизации РТО с учетом ограничения по напряжению в сравнении с [12].



Рис. 5. Результат, полученный РТО методом в сравнении с [12], с учетом ограничения по напряжению

Заключение

В работе представлены подходы и алгоритмы, планируемые к использованию в базовой версии программного обеспечения «Виртуальный 3D-принтер» для нахождения новых топологий конструкций. В модуле ТопОпт в настоящее время реализован расчёт двумерных и трёхмерных задач топологической оптимизации методами ESO, BESO, PTO, SIMP на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции. Приведены результаты некоторых задач, которые демонстрируют работоспособность и функциональные возможности модуля топологической оптимизации.

Литература

1. Huang X., Xie Y. M. Evolutionary topology optimization of continuum structures // John Wiley & Sons, UK, 2010.

2. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимизация топологии конструкции в пакете ABAQUS // Теоретические и практические аспекты развития отечественного аваистроения, 2014.

3. Bendsoe M. P. and Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Method and Application. Berlin, 2003.

4. Huang X. and Xie Y. M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials // Comput. Mech., 2009.

5. Zhu J. H., Zhang W. H. and Qiu K. P. Bidirectional evolutionary topology optimization using element replaceable method // Comput. Mech., 2007. 6. Yang X. Y., Xie Y. M., Steven, G. P. and Querin O. M. Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization // AIAA Journal., 1999.

7. Bendsoe M. P. and Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization //Archive Appl. Mech, 1999.

8. Rietz A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. //Struct. Multidisc. Optim., 2001.

9. Prager W. Optimality criteria in structural design // Proceeding of the National Academy of Sciences of the United State of America. 1968.

10. Querin O. M., Young V., Steven G. P. and Xie Y. M. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 2000.

11. Huang X. and Xie Y.M. Evolutionary topology optimization of continuum structures with an additional displacement constraint. Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010.

12. Biykli E. and To A.C. Proportional Topology Optimization: A new non-sensitivity method for solving stress constrained and minimum compliance problems and its implementation in MATLAB. Plos ONE. 2015.

13. Paris J., Navarrina F., Colominas I., Casteleiro M. Topology optimization of continuum structures with local and global stress constraints. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2009.

14. Bruggi M. On an alternative approach to stress constraints relaxation in topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2008.

15. Andersen E., Clausen A., Schevenels M., Lazarov BS., Sigmund O. Efficiend topology optimization . Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011.

16. Bruns TE., Tortorelli DA. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2001.

17. Le C., Norato J., Bruns T., Ha C., Tortorelli D. Stress-based topology optimization of continua. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010.

18. Sigmund O. Morphology-based black and white filters for topology optimization. Structural and Multid-isciplinary Optimization. 2007.

19. O. A 99 line topology optimization code written in MatLab. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2001.

ОДНОМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ГРАНИЦУ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ КОРОТКОГО ЕДИНИЧНОГО ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

<u>А. С. Мокеев</u>, В. Г. Рогачев, Е. А. Кудряшов, Ю. Н. Дерюгин

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

Введение

Рост быстродействия и памяти ЭВМ привел к тому, что математическое моделирование стало важным дополнением к экспериментальным исследованиям поведения различных конструкций под действием динамических нагрузок.

В исследовании быстропротекающих процессов на первый план выходит точность расчетных и измеряемых величин.

В настоящее время, при обработке результатов экспериментов, актуальной является информация о точности моделирования затухания импульса ударного сжатия с глубиной при многократном отражении от свободных поверхностей сплошной среды.

При распространении импульса в сплошной среде его амплитуда уменьшается, а длительность возрастает. В случае плоской волны, распространяющейся в газе, этот процесс описывается соотношениями [1]:

$$\upsilon = \frac{\upsilon_0}{\sqrt{1 + \frac{\alpha \upsilon_0}{l_0} \frac{(x - x_0)}{c_0}}} \sim \frac{\upsilon_0}{\sqrt{1 + \frac{\alpha \upsilon_0}{l_0}t}},$$
(1)

$$l = l_0 \sqrt{1 + \frac{\alpha \upsilon_0}{l_0} \frac{(x - x_0)}{c_0}} \sim l_0 \sqrt{1 + \frac{\alpha \upsilon_0}{l_0} t},$$
 (2)

где x – текущая декартовая координата, x_0 – фиксированная координата, v_0 – амплитуда скорости в точке x_0 , l_0 – пространственная протяженность импульса в точке x_0 , $\alpha = \gamma + 1/2$, γ – показатель адиабаты для среды, в которой распространяется волна, c_0 – продольная скорость звука, $t = (x - x_0)/c_0$ – время, за которое импульс проходит расстояние от x_0 до x.

Целью данной работы является одномерное численное моделирование распространения слабой ударной волны в сплошной среде при воздействии на ее границу короткого единичного импульса лазерного излучения и оценка минимального числа точек расчетной сетки, необходимого для эффективного и точного описания указанного процесса.

В рамках пакета программ «ДИАДА» проведено исследование профиля скорости слабой ударной

волны на больших временах вплоть до $t_{\kappa} = 300$ мкс. Показано, что профиль скорости с течением времени приобретает треугольную форму, как и предсказывает теория, и после многократных отражений от свободной границы искажается [1–2].

Проведено исследование зависимости амплитуды скорости волны от числа точек расчетной сетки. Показано, что с увеличением числа точек расчетной сетки относительная погрешность амплитуды скорости волны $\delta u_{\text{max}} \rightarrow 0$. Оказалось, что для описания распространения слабой ударной волны с относительной погрешностью $\delta u_{\text{max}} \sim 5 \%$ на временах $t \ge 1$ мкс необходимо увеличивать число расчетных точек $N \ge 30000$.

Проведено исследование уширения импульса и затухания слабой ударной волны со временем. Показано, что ширина импульса на полувысоте возрастает со временем как $t^{1/2}$, а амплитуда скорости слабой ударной волны при $t \to \infty$ асимптотически затухает как $t^{-1/2}$, что согласуется с теорией [1]. В момент выхода слабой ударной волны на свободную поверхность амплитуда скорости удваивается.

Постановка задачи

Рассмотрим одномерную газодинамическую задачу движения сплошной среды – пластины из сплава алюминия АМг6, которая показана на рис. 1. Параметры расчетов соответствуют постановке лазерных экспериментов. Основные свойства используемого материала представлены в табл. 1. Толщина пластины *l* = 975 мкм. В начальный момент времени t = 0 пластина находится в состоянии покоя $u_0 = 0$, давление в пластине составляет $p_0 =$ = 0,0001 ГПа. В последующий момент времени t > 0на левую границу пластины прикладывается нагрузка в виде короткого прямоугольного импульса давления с амплитудой $p_{\mu} = 5 \Gamma \Pi a$, создаваемого лазерным излучением. Длительность импульса составляет $t_u = 5$ нс. Предполагается, что пластина находится в воздухе при атмосферном давлении, поэтому давление на границах составляет $p_0 = 0,0001$ ГПа.

Стоит заметить, что давление p_0 столь мало по сравнению с давлением в твердом теле, сжатом ударной волной $p_0 << p_w$, что им всегда можно пренебречь и считать, что разгрузка в воздух не отличается от разгрузки в вакуум. В исследуемом образце ударная волна с амплитудой $p_u = 5$ ГПа $<< \rho_0 c_0^2 = 83$ ГПа является «слабой». Такая волна мало отличается от акустической волны, и она распространяется со скоростью, близкой к продольной скорости звука.



Рис. 1. Постановка задачи исследования

Таблица 1

Основные свойства сплава алюминия [3-4]

Свойст- во	Плот- ность р ₀ , г/см ³	Коэффици- ент <i>А</i> , ГПа	Показа- тель <i>п</i>	Продольная скорость звука c ₀ , км/с
Значе- ние	2,71	19,7	4,2	5,526

Система уравнений газовой динамики в одномерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial \boldsymbol{R}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial x} = 0, \qquad (3)$$

где
$$\boldsymbol{R} = \left\{ \rho, \rho u, \rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right\}^T, \quad \boldsymbol{Q} = \left\{ \rho u, \rho u^2 + \right\}$$

+ $p, \rho u \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right\}^T$, ε – удельная внутренняя

энергия, u – скорость движения сплошной среды, ρ – плотность этой среды, p – давление, t – время, x – декартовая координата.

Система (3) замыкается уравнением состояния $f(\rho, \varepsilon, p) = 0$. Будем использовать эмпирическое уравнение состояние конденсированного вещества типа:

$$p = p_0 + A\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right],\tag{4}$$

в котором показатель *n* и коэффициент *A* считаются постоянными. Постоянные *A* и *n* связаны между собой соотношением, в которое входит сжимаемость вещества при нормальных условиях – скорость звука (см. табл. 1):

$$c_0^2 = -V_0^2 \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S = V_0 A n = \frac{A n}{\rho_0}.$$
 (5)

В начальный момент времени пластина находится в неподвижном состоянии с начальной плотностью ρ_0 и давлением p_0 :

$$\begin{cases} \rho(x,0) = \rho_0, \\ u(x,0) = 0, \\ p(x,0) = p_0. \end{cases}$$
(6)

Соответствующие граничные условия можно представить в виде:

$$\begin{cases} p(0,t) = \begin{cases} (p_u + p_0), & 0 < t \le t_u \\ p_0, & t_u < t < t_\kappa \end{cases}, \\ p(l,t) = p_0, \end{cases}$$
(7)

где t_{κ} – конечное время расчета.

Система уравнений (3)–(4), (6)–(7) представляет собой полностью сформулированную начально-краевую задачу.

Описание программной реализации

Для решения одномерных, двумерных и трехмерных задач механики сплошных сред в ИТМФ (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») был создан пакет программ «ДИАДА» [5], расчетная методика в котором основывается на следующих положениях:

сегментация расчетной области;

 выделение в качестве границ счетных областей основных особенностей течения, таких как слабые разрывы, ударные и детонационные волны, контактные разрывы и фронты пламени, Эйлеровы подвижные и неподвижные линии;

 – основным способом передачи граничных условий является решение автомодельной задачи о распаде произвольного разрыва;

 применение в многомерных методиках криволинейных подвижных Эйлеровых сеток, что позволяет адаптировать разностную сетку к особенностям течения;

- применение консервативных разностных схем;

 перестройка структуры задачи в процессе счета с целью повышения технологичности расчетов.

В качестве базовой схемы в этом пакете программ используется разностная схема Годунова [6–7]. Это монотонная разностная схема первого порядка точности.

Полная задача, которая включает решение одномерных, двумерных и трехмерных задач механики сплошных сред, сегментируется на ряд задач. Сегментация проводится, во-первых, по размерности задачи, во-вторых, по различию в подходах внутренней сегментации и по топологии расчетной области и способа организации и хранения информации и, в-третьих, по расчету однотипных задач со своим шагом по времени. Каждая задача, в свою очередь, сегментируется на ряд областей.

Расчет шага полной задачи состоит из последовательного решения каждой из задач, находящихся в счете. При расчете задачи, вначале разрешаются граничные условия, являющиеся внутренними между задачами, а затем рассчитывается сама задача.

Для одномерной задачи расчетная область состоит из ряда отрезков (областей) на оси координат. Элементами области являются границы. Характеристикой одномерных задач является также тип геометрии течения: плоское, цилиндрически симметричное, сферически симметричное и течение в каналовом приближении.

Расчет одномерной задачи состоит из пяти этапов. На первом этапе разрешаются граничные условия для каждой из границ. На втором этапе находится новое положение границ и сетка в области на новый момент. На третьем этапе определяются расчетные параметры на новом временном слое. После этого на четвертом этапе, в соответствии с методом расщепления по физическим процессам, рассчитываются дополнительные процессы, такие как киреакций. Ha нетика химических последнем, заключительном этапе, определяются интегральные потоки через границы и интегралы по области, анализируется состояние области (расчетной сетки и численного решения) и в зависимости от ряда критериев могут производится нестандартные действия, такие как перестройка сетки и интерполяция расчетных параметров.

Результаты расчета

Расчет проводился на Эйлеровой сетке. Шаг по времени составлял $\tau = 1 \cdot 10^{-12}$ с.

Число точек расчетной сетки по толщине пластины *N* оценивалось исходя из следующих соображений. За время воздействия импульса *t_u* волна пройдет путь, равный:

$$s = c_0 t_u. \tag{8}$$

Расчетный шаг по толщине пластины определяется, как:

$$h = \frac{l}{N}.$$
 (9)

Предполагалось, что для удовлетворительного описания воздействия импульса лазерного излучения необходимо, чтобы на импульс приходилось не менее 100 точек:

$$N_u = \frac{s}{h} \ge 100. \tag{10}$$

Таким образом, подставляя выражения (8), (9) \rightarrow (10) и выражая число точек расчетной сетки по толщине пластины N, получим:

$$N = \frac{N_u l}{c_0 t_u} = \frac{100 \cdot 975 \cdot 10^{-6}}{5526 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} \approx 3530.$$
(11)

Конечное время расчета составляло $t_{\kappa} = 300$ мкс.

Были проведены расчеты на сетках, состоящих из 3000, 5000, 10000, 30000, 40000 и 50000 точек по толщине пластины N.

В табл. 2 показано время, затраченное на расчет до t = 1 мкс в зависимости от числа расчетных точек.

Таблица 2

Время, затрачиваемое на расчет до t = 1 мкс

Ν	10000	30000	40000	50000
t _{расч.} , МИН	3,4	27,8	50,8	102,8

На первом этапе работы проводилось исследование профиля скорости слабой ударной волны с течением времени u(x, t). На рис. 2–4 показаны графики профиля скорости u(x) на разные моменты времени до первого отражения от свободной поверхности, после первого отражения и после второго отражения соответственно при количестве расчетных точек N = 10000. Стрелкой здесь и далее будет показано направление движения волны со скоростью звука c_0 .

Исходя из рис. 2 видно, что профиль скорости u(x) с течением времени приобретает треугольную форму, как и предсказывает теория [1–2], амплитуда скорости, при этом, затухает со временем.

Из рис. З видно, что после отражения импульса от свободной поверхности волна разгрузки (разрежения) бежит назад по пластине со скоростью звука c_0 , соответствующей состоянию за фронтом ударной волны, а сама пластина приобретает дополнительную скорость u' в направлении первоначального движения ударной волны, равную массовой скорости u в ударной волне. Так же из рис. З видно, что профиль скорости u(x) искажается вследствие отражения волны от свободной поверхности исследуемого образца.

Из рис. 4 видно, что после второго отражения профиль скорости u(x) несимметричен, но с течением времени приобретает треугольную форму.

Далее проводилось исследование профиля скорости слабой ударной волны на больших временах вплоть до $t_{\kappa} = 300$ мкс. На рис. 5 показан профиль скорости слабой ударной волны u(x) на различные



Рис. 2. График зависимости скорости *и* от координаты *x* по толщине пластины на различные моменты времени *t* до первого отражения от свободной границы



Рис. 3. График зависимости скорости *и* от координаты *x* по толщине пластины на различные моменты времени *t* после первого отражения от свободной границы

моменты времени t. На рис. 6 представлен соответствующий график зависимости амплитуды скорости u_{max} от числа точек расчетной сетки по толщине пластины N.

Исходя из рис. 5–6 видно, что уже на момент времени t = 1 мкс для корректного описания профиля скорости слабой ударной волны, вызванной коротким импульсом лазерного излучения, необходимо увеличить число точек по толщине пластины $N \sim 30000$. На импульс, в таком случае, приходится $N_u \sim 1417$ точек. Относительная погрешность значения амплитуды скорости составляет $\delta u_{\rm max} \sim 2\%$. Ширину импульса волны $\Delta_{1/2}$ будем оценивать на полувысоте. На момент времени t = 1 мкс $\Delta_{1/2} \approx 60$ мкм.

На момент времени t = 10 мкс сходимость по значению амплитуды скорости волны достигается при числе расчетных точек по толщине пластины $N \ge 30000$. При N = 30000 относительная погрешность значения амплитуды скорости волны составляет $\delta u_{\rm max} \sim 4 \%$. Из сравнения импульсов на рис. 5 видно, как уширение профиля волны, так и уменьшение амплитуды скорости волны со временем. Ширина профиля волны на момент времени t = 10 мкс составляет $\Delta_{1/2} \approx 80$ мкм.



Рис. 4. График зависимости скорости *и* от координаты *х* по толщине пластины на различные моменты времени *t* после второго отражения от свободной границы



Рис. 5. График зависимости скорости *и* от координаты *x* по толщине пластины на различные моменты времени *t*

При N = 30000 на момент времени t = 100 мкс относительная погрешность значения амплитуды скорости волны составляет $\delta u_{\max} \sim 7 \%$. Ширина профиля волны при этом составляет $\Delta_{1/2} \approx 170$ мкм.

Исходя из рис. 5 видно, что вследствие многократных отражений и использования в расчетной методике схемной вязкости профиль скорости слабой ударной волны искажается.

Уже на момент времени t = 200 мкс сходимость в определении амплитуды скорости волны не достигается даже при числе расчетных точек N = 50000. При N = 30000 относительная погрешность значения амплитуды скорости волны составляет порядка $\delta u_{max} \sim 15\%$. Ширина профиля волны на момент времени t = 200 мкс составляет $\Delta_{1/2} \approx 220$ мкм.

Далее оценим изменение ширины импульса с течением времени. На рис. 7 представлен график зависимости ширины импульса слабой ударной волны на полувысоте $\Delta_{1/2}$ от времени *t* при числе точек по толщине пластины N = 50000.

Из рис. 7 видно, что расчетные значения ширины импульса на полувысоте хорошо согласуются с теоретической зависимостью, согласно которой ширина импульса возрастает со временем, как *t*^{1/2}.

На заключительном этапе работы проводилось исследование затухания слабой ударной волны



Рис. 6. График зависимости амплитуды скорости u_{max} от числа точек по толщине пластины N на различные моменты времени t



Рис. 7. График зависимости ширины импульса слабой ударной волны на полувысоте $\Delta_{1/2}$ от времени *t*



Рис. 8. График зависимости амплитуды скорости слабой ударной волны u_{max} от времени *t* при числе точек по толщине пластины N = 50000



Рис. 9. График огибающей кривой зависимости амплитуды скорости u_{max} на правой границе от времени *t* при числе точек по толщине пластины N = 50000

на больших временах вплоть до $t_{\kappa} = 300$ мкс. На рис. 8 показан график зависимости амплитуды скорости слабой ударной волны u_{max} от времени *t* при числе точек по толщине пластины N = 50000.

На рис. 9 показан график огибающей кривой зависимости амплитуды скорости u_{max} на правой границе пластины от времени *t* при числе точек по толщине пластины N = 50000.

Из рис. 8–9 видно, что амплитуда скорости слабой ударной волны затухает со временем и при $t \to \infty$ асимптотически затухает как $t^{-1/2}$, что согласуется с теорией. Также из рис. 8–9 видно, что в момент выхода слабой ударной волны на свободную поверхность амплитуда скорости удваивается.

Заключение

В рамках пакета программ «ДИАДА» проведено одномерное численное моделирование распространения слабой ударной волны, вызванной воздействием на границу сплошной среды короткого единичного импульса лазерного излучения.

В качестве образца для исследования была выбрана однородная пластина из сплава алюминия АМг6 толщиной *l* = 975 мкм.

Предполагалось, что в начальный момент времени t = 0 пластина находилась в состоянии покоя $u_0 = 0$, давление в пластине составляло $p_0 = 0,0001$ ГПа. В последующий момент времени t > 0 на левую границу пластины прикладывалась нагрузка в виде короткого прямоугольного импульса давления с амплитудой $p_u = 5$ ГПа, создаваемого лазерным излучением. Длительность импульса составляла $t_u = 5$ нс. Пластина находилась в воздухе при атмосферном давлении, давление на границах составляло $p_0 = 0,0001$ ГПа.

Шаг по времени составлял $\tau = 1 \cdot 10^{-12}$ с. Конечное время расчета составляло $t_{\kappa} = 300$ мкс. Были проведены расчеты на сетках, состоящих из N = 3000, 5000, 10000, 30000, 40000 и 50000 точек по толщине пластины.

Полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

 Показано, что профиль скорости с течением времени приобретает треугольную форму, как и предсказывает теория и после многократных отражений от свободной границы искажается.

– Показано, что с увеличением числа точек расчетной сетки относительная погрешность амплитуды скорости волны $\delta u_{\text{max}} \rightarrow 0$. Оказалось, что для описания распространения слабой ударной волны с относительной погрешностью амплитуды скорости $\delta u_{\text{max}} \sim 5 \%$ на больших временах $t \ge 1$ мкс необходимо увеличивать число расчетных точек $N \ge 30000$.

– Показано, что расчетные значения ширины импульса на полувысоте хорошо согласуются с теоретической зависимостью [1], согласно которой ширина импульса возрастает со временем, как $t^{-1/2}$.

– Показано, что при $t \to \infty$ амплитуда скорости слабой ударной волны асимптотически затухает как $t^{-1/2}$, что согласуется с теорией [1]. В момент выхода слабой ударной волны на свободную поверхность амплитуда скорости удваивается.

Планируется проведение одномерных и двумерных расчетов с сильными ударными волнами в многослойных средах.

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.. Механика сплошных сред. М., ГТТИ, 1954.

2. Ландау Л. Д. Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения. Журнал П.М.М., 9, 286, 1945.

3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966 г., 688 стр. с илл.

4. Челышев В. П. Об изменениях давления на поверхности преграды при контактном взрыве ВВ / В. П. Челышев, Б. И. Шехтер, Л. А. Шушко // ФГВ, Т. 6, № 2, 1970, С. 217–223.

5. Дерюгин Ю. Н., Казакова И. Ф., Прошин М. М., Сизова Л. И., Тихомиров Б. П. Пакет программ расчета газодинамических течений в трубах переменного сечения. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики, 1988. – вып. I. – С. 65–69.

6. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Матем сб. 1959. Т. 47(89). № 3. С. 271–306.

7. Годунов С. К., Забродин А. А., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976, С. 400.

ПРЕПОСТПРОЦЕССОР ЛОГОС. АЛГОРИТМ УПРОЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АЭРОГИДРОМЕХАНИКИ

Е. О. Моськина

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

Введение

В настоящее время в рамках работ по препостпроцессору ЛОГОС.ПреПост [1, 2] ведется разработка генератора поверхностных треугольных сеток.

ЛОГОС.ПреПост – единая система для задания начальных данных и генерации сеток для численного решения задач инженерного анализа и проведения визуальной предобработки сеточной модели. Также ЛОГОС.ПреПост предоставляет графические интерфейсы для подготовки и выполнения инженерного анализа с использованием отечественных счетных кодов и постобработки результатов счета.

Одним направлений ИЗ разработки ЛОГОС.ПреПост является генерация объемных сеток большой размерности. В первую очередь пользователей интересует разработка автоматических генераторов неструктурированных сеток, которые позволяют с наименьшими трудозатратами проводить подготовку дискретных моделей. В частности, в ЛОГОС.ПреПост одним из способов автоматического создания нерегулярной сетки является генерация сеток методом отсечения на основе поверхностной треугольной сетки, поэтому проблема быстрой автоматической генерации качественных треугольных сеток очень актуальна.

Поверхностные треугольные сетки

В докладе рассматривается построение поверхностной треугольной сетки для модели в фасеточном представлении. Под треугольной сеткой будем понимать дискретное представление поверхности трехмерного тела с помощью набора связанных треугольников. Геометрия в фасеточном представлении также является треугольной сеткой, однако часто низкого качества, что недопустимо для исходных данных объемного генератора. Поэтому необходимо построение новой поверхностной сетки, которая будет удовлетворять требованиям объемного генератора.

Процесс построения поверхностной треугольной сетки состоит из следующих этапов:

1) исправление дефектов исходной сетки;

2) определение характерных особенностей геометрии;

 разбиение сетки на области, однозначно проецируемые на плоскость; 4) вычисление значений кривизны и размеров элементов сетки;

5) генерация новой поверхностной сетки;

6) улучшение качества полученной сетки.

Описание проблемы

В ходе разработки библиотеки поверхностного генератора было замечено, что процесс построения поверхностной сетки может занимать длительное время для достаточно подробных исходных моделей (содержащих более 1 млн. треугольников). Результаты тестирования показали, что большую часть времени занимает этап разбиения на области, однозначно проецируемые на плоскость. Одним из факторов длительного выполнения данного этапа является большое количество треугольников в исходной модели. Для того чтобы сократить число треугольников в исходной модели и уменьшить время этапа разбиения на области, был реализован алгоритм упрощения треугольных сеток, после чего полная цепочка построения поверхностной сетки выглядит следующим образом:

1) исправление дефектов исходной сетки;

2) определение характерных особенностей геометрии;

3) упрощение исходной сетки;

4) разбиение сетки на области, однозначно проецируемые на плоскость;

5) значений кривизны и размеров элементов сетки;

6) генерация новой поверхностной сетки;

7) улучшение качества полученной сетки.

Алгоритм упрощения треугольной сетки

Для программной реализации был выбран алгоритм упрощения треугольной сетки, предложенный в статье [3] авторами G. Turk и P. Lindstrom. Помимо описания алгоритма в статье проводится анализ других существующих алгоритмов [4, 5, 6, 7, 8]. По производительности и отклонению упрощенной поверхности выбранный алгоритм является оптимальным.

В качестве входных данных алгоритму упрощения подается треугольная сетка. В результате выполнения алгоритма получаем сетку с меньшим числом
треугольников, аппроксимирующую исходную поверхность с другой точностью.

Алгоритм упрощения основан на повторяющейся процедуре удаления ребра. В таком подходе выбирается ребро сетки и заменяется одной вершиной. Таким образом, в результате одной итерации удаляется одна вершина, три ребра и два треугольника сетки (рис. 1).

Алгоритм упрощения сетки содержит два ключевых шага: 1) выбор позиции новой точки, заменяющей удаленное ребро; 2) составление очереди ребер для удаления.

Для выбора новой точки было рассмотрено несколько подходов: выбор одной из двух вершин ребра, выбор срединной точки ребра и выбор точки, которая является оптимальной по критерию, описанному в статье. Проблема выбора новой точки в последнем случае может рассматриваться как задача оптимизации. Было замечено, что первый и второй режимы визуально проигрывают режиму схлопывания ребра в оптимальную точку ввиду невозможности варьировать положение точки: поверхность выглядит более «мятой», с большим числом заломов.

При выборе новой точки, которая заменяет удаленное ребро, минимизируются значения таких геометрических параметров, как объем и площадь. Основной подход для нахождения новой точки – составление системы линейных ограничений, решением которой и будет новая точка, то есть пересечением трех непараллельных плоскостей. Следует отметить, что в случаях, когда два или более ограничения линейно зависимы с учетом заданной погрешности, рассматриваются дополнительные ограничения, которые будут добавлены в систему в порядке важности.

Для составления системы ограничений решается задача сохранения объёма и границ исходной модели, а также задачи оптимизации локальных объёмов, локальной формы границы и формы новых треугольников.

После нахождения новой вершины для замены ребра необходимо определить «стоимость» удаления этого ребра и добавить его в очередь для удаления. Стоимость ребра вычисляется как линейная комбинация целевых функций, которые были минимизированы при нахождении оптимальной точки, после подстановки найденной точки.

Обработка вырожденных случаев при реализации алгоритма упрощения

В статье приводились результаты работы алгоритма для двух известных тестовых моделей: Human Hand и Stanford Bunny (рис. 2).

В рамках работ по реализации алгоритма в поверхностном генераторе ЛОГОС.ПреПост проводи-



Рис. 1. Фрагмент сетки: а – до операции удаления ребра е, b – после операции удаления ребра е



Рис. 2. Модели Human Hand и Stanford Bunny



Рис. 4. Самопересечение близких поверхностей (область указана стрелкой) модели после упрощения сетки: одна из поверхностей «наезжает» на другую





лось тестирование на базе из 75 задач, включающей как геометрические примитивы, так и части практических конструкций аэрогидромеханики, а также полномасштабные промышленные модели летательных аппаратов. Ввиду расширения и усложнения круга задач, на которых проводилось тестирование алгоритма упрощения в ходе его реализации, в алгоритме, изложенном в статье, было выявлено несколько слабых мест, требующих дополнительной обработки и оптимизации.

Самопересечения поверхностей

В одной из первых реализаций в качестве формальной точки останова алгоритма упрощения было выбрано ограничение на достигнутое число треугольников, заданное пользователем как процент от начального числа треугольников модели. Такой подход был не совсем корректным, так как модель может быть сложной формы и даже минимальное упрощение может приводить к потере ее формы.

Если в исходной модели имеются близкие поверхности (рис. 3), в результате алгоритма могут появляться самопересечения поверхностей (рис. 4). Поэтому требовался другой критерий останова алгоритма.

Контроль изменения угла между соседними треугольниками

Ключевой вопрос заключался в том, как максимально упростить поверхность, чтобы впоследствии выиграть время на этапе разбиения на области, но вместе с тем не потерять форму модели и гладкость поверхности.

Для решения этой проблемы был введен параметр, контролирующий изменение угла между соседними треугольниками сетки в окружении удаляемого ребра (рис. 5). Под окружением удаляемого



Рис. 6. Габаритная коробка модели: а – до упрощения; b – после упрощения



Рис. 7. Схематичное представление появления топологической несвязности: а – связная треугольная сетка; b – сетка после удаления ребра в основании призмы, появление многолистности; с – сетка после удаления еще одного ребра в основании призмы, потеря топологической связности

ребра будем подразумевать треугольники, у которых одна из вершин является вершиной удаляемого ребра. После удаления ребра смотрим все треугольники его окружения: если для какого-либо из них угол с соседним треугольником изменился сильнее заданного параметра, то удаление ребра не производится. Чем меньше задано значение данного параметра, тем меньше будет упрощена поверхность.

С помощью такого подхода при задании небольшого значения параметра сохраняются все характерные особенности модели и максимально упрощаются плоские участки. На рис. ба представлена достаточно подробная сетка для габаритной коробки одной из моделей аэрогидромеханики до и после упрощения соответственно. На рис. 6b видно, что сетка на габаритной коробке максимально упрощена с учетом сохранения ребер, принадлежащих характерным особенностям модели (стыки сторон габаритной коробки).

Несвязные поверхности

Вторая проблема – это потенциальная опасность формирования так называемой «пирамиды, вырастающей из точки на поверхности», то есть потеря топологической связности.

Рассмотрим схематично: после одной из итераций на поверхности вырастает призма, которая при дальнейшем схлопывании ребер в ее основании может превратиться в пирамиду, выходящую из точки на поверхности (рис. 7).

Было выявлено, что такой эффект появляется при удалении ребра между треугольниками с большой разницей площадей. Поэтому исключения подобной ситуации была добавлена проверка соотношения площадей соседних треугольников, а также проверка на корректную связность сетки после каждой итерации удаления ребра.



Рис. 8. Распределение треугольников по значению качества полученных треугольников для модели крыла самолета: а – без ограничения по минимальному качеству, b – с ограничением по минимальному качеству



Рис. 9. Ограничение на отклонение средней нормали треугольников из окружения удаляемого ребра: а – до операции удаления ребра, b – после операции удаления ребра

Низкое качество треугольников

В ходе реализации алгоритма была выявлена проблема возможного ухудшения качества сетки после алгоритма упрощения. Под качеством сетки подразумевается минимальное и среднее значение меры качества, вычисленное среди всех ее треугольников. Идеальным считается равносторонний треугольник, его качество равно единице. Худшим случаем является треугольник нулевой площади, его качество равно нулю.

Для решения данной проблемы была добавлена проверка, отслеживающая изменение качества сетки после каждой итерации упрощения и контролирующая изменение минимального качества. В качестве критерия, определяющего меру качества, было выбрано соотношение радиусов вписанной и описанной окружности треугольника. На рис. 8 показано распределение качества треугольников в сетке до добавления ограничения и после соответственно.

Дополнительный критерий для сохранения гладкости поверхности

Для большего сохранения гладкости поверхности был введен критерий, ограничивающий отклонение средней нормали, вычисленной для треугольников, смежных вершинам удаляемого ребра (рис. 9).



Рис. 10. Фрагмент сетки для модели крыла самолета с мотогондолой: а – до упрощения (64 тыс. треугольников); b – после упрощения со значением параметра изменения угла 2 градуса (52 тыс. треугольников); с – после упрощения со значением параметра изменения угла 10 градусов (26 тыс. треугольников); d – после упрощения со значением параметра изменения угла 25 градусов (19 тыс. треугольников)

Влияние параметра, контролирующего изменение угла, на степень упрощения сетки

На рис. 10а представлен фрагмент исходной сетки для модели крыла самолета с мотогондолой, а на рис. 10b–10d – тот же фрагмент сетки после этапа упрощения с различным значением параметра, контролирующего изменение угла.

На рис. 11. приведен график зависимости количества треугольников в сетке после алгоритма упрощения от значения параметра изменения угла для задач различной сложности. Чем больше угол, тем сильнее будет упрощена исходная сетка.

Отклонение упрощенной сетки от исходной поверхности

Для получения численных данных о разнице поверхностей использовалась программа с открытым исходным кодом Metro [9], которая вычисляет максимум расстояния от выборки точек исходной поверхности до упрощенной и в обратную сторону. Затем вычисляется максимум их этих двух отклонений – расстояние Хаусдорффа. С помощью данной программы было подтверждено, что чем сильнее упрощается поверхность с увеличением значения параметра изменения угла, тем сильнее увеличивается величина отклонения между поверхностями (рис. 12).

Производительность алгоритма упрощения поверхностной сетки

В рамках тестирования производительности реализованного алгоритма были произведены замеры времени исполнения алгоритма упрощения и общего времени генерации поверхностной треугольной сетки для тестовой базы задач различной сложности. На рис. 13 представлены графики зависимости времени исполнения алгоритма упрощения и общего времени генерации поверхностной сетки от значения параметра изменения угла для одной из производственных моделей.

Выбор значения параметра минимального угла

Исходя из результатов проведенных исследований влияния параметра изменения угла на упрощение сетки, в качестве значения по умолчанию был выбран угол 2 градуса. Диаграмма на рис. 14 показы-



Рис. 11. График зависимости количества треугольников после упрощения от значения параметра изменения угла для моделей различной сложности



Рис. 12. График зависимости расстояния Хаусдорффа от параметра изменения угла для двух моделей различной сложности



Рис. 13 График зависимости времени исполнения алгоритма упрощения и общего времени генерации поверхностной сетки от параметра изменения угла для модели, состоящей из 1.2 млн. треугольников



Рис. 14. Диаграмма распределения времени генерации сетки для задач различной сложности с этапом упрощения сетки



Рис. 15. Диаграмма времени генерации с активным и неактивным этапом упрощения сетки (низкий и высокий столбцы соответственно) для задач различной сложности

вает, какую часть от общего времени генерации сетки занимает алгоритм упрощения. На рис. 15 изображена диаграмма, демонстрирующая сокращение общего времени генерации поверхностной сетки с реализованным алгоритмом упрощения для задач различного уровня сложности.

Заключение

В настоящий момент реализованный алгоритм упрощения треугольной сетки интегрирован в ЛОГОС.ПреПост и применяется в цепочке построения сеточных моделей для решения задач аэрогидромеханики. Использование алгоритма на практических задачах позволяет уменьшить время построения поверхностных сеток до 60 %.

Литература

1. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Лазарев В. В., Черенкова М. В., Фролова Е. А., Лукичев А. Н., Смолкина Д. Н., Купалова А. Г., Кузьменко М. В., Сергеева А. С., Попова Н. В., и др. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС.Препост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». 2013. С. 585–592.8.

2. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К. и др. Многофункциональный пакет программ Логос для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на суперЭВМ // Тезисы докладов на XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». 2012. С. 108.

3. Lindstrom, P., Turk, G. Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification // Proc. Visualization '98, IEEE Computer Soc. Press – Oct. 1998 – Pp. 279–286.

4. Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F.,

Andwright, W. Simplification Envelopes. Proceedings of SIGGRAPH 96. In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1996, ACM SIGGRAPH, pp. 119–128.

5. Ciampalini, A., Cignoni, P.,Montani, C., And Scopigno, R. Multiresolution Decimation Based On Global Error. The Visual Computer, Springer International, 13(5), 1997, pp. 228–246. 6. Garland, M. And Heckbert, P. S. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics. Proceedingsof Siggraph 97. In Computergraphics Proceedings, Annualconference Series, 1997, Acm Siggraph, Pp. 209–216.

7. Hoppe, H., Derose, T., Duchamp, T., Mcdonald, J., And Stuetzle, W. Mesh Optimization. Proceedings Of Siggraph 93. In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1993, Acm Siggraph, Pp. 19–26.

8. Hoppe, H. Progressive Meshes. Proceedings Of Siggraph 96. In Computer Graphics Proceedings, Annual Conferenceseries, 1996, Acm Siggraph, Pp. 99–108.

9. Cignoni P., Rocchini C., Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. // Technical Report B4–01–01–96, Istituto I. E. I.–C. N. R. – Pisa, Italy – January 1996.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<u>Е. И. Наумова,</u> Д. Ю. Дьянов, М. В. Медведкина, Е. В. Шувалова

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

Введение

ФГУП «РФЯШ-В настояшее время во ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС [1-2] для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных pecypcax. Программный модуль (ПМ) пакета программ ЛОГОС для моделирования задач прочности (ЛОГОС-ПА) обеспечивает решение задач статической, динамической и вибрационной прочности.

Одним из главных условий успешного внедрения пакета программ ЛОГОС в полный цикл разработки изделий на предприятиях обороннопромышленного комплекса и высокотехнологичных предприятий гражданской отрасли является программная реализация современных моделей поведения конструкционных материалов, в частности композиционных материалов.

Композиционные материалы [3–8] находят широкое применение в инженерной практике, так как позволяют создавать конструкции с уникальными весовыми, прочностными и диссипативными характеристиками, которых практически невозможно достичь использованием в конструкциях традиционных материалов.

Композиционные материалы, или композиты, состоят из двух и более компонент, существенно отличающихся по физико-механическим характеристикам. В их основе лежит уникальная по простоте идея армирования, когда соединяют «полярные» по свойствам материалы – податливую матрицу и жесткую и прочную арматуру. Армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость), а матрица (или связующее) обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений [3–8].

Современные волокнистые композиты являются неоднородными анизотропными материалами. Упругость и неупругость волокнистых композитов определяются типом арматуры (стекло-, боро-, углеи органоволокна) и матриц (полимерных, углеродных, металлических, керамических), степенью их взаимодействия в композите, а также углом нагружения относительно направлений армирования. Принято полагать, что композитные материалы обладают двумя уровнями неоднородности: микронеоднородностью, связанной с наличием двух фаз (волокон и матрицы), и макронеоднородностью, связанной с наличием в материале различным образом ориентированных микронеоднородных слоев. При расчете и проектировании конструкций обычно учитывают только второй уровень неоднородности материала, т. е. считается, что он состоит из совокупности квазиоднородных слоев, свойства которых известны. Анализ зависимости этих свойств характеристик исходных компонентов и их содержания в материале является предметом микромеханики композитов, основная задача которой заключается в определении эффективных модулей упругости, т.е. коэффициентов, связывающих усредненные по объему напряжения и деформации [3-8].

В докладе представлены подходы и алгоритмы, используемые в ПМ ЛОГОС-ПА при численном моделировании процесса динамического деформирования композиционных конструкций.

Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованного функционала в докладе представлены результаты численных расчетов ряда тестовых задач, проведенных с использованием пакета программ ЛОГОС.

Методы моделирования волокнистых и слоистых композитов

Методы моделирования волокнистых и слоистых композитов можно разделить на несколько видов [7]:

1. прямой метод моделирования волокон и слоев посредством объемных, оболочечных и балочных элементов. Данный подход напрямую моделирует все волокна и слои композитного материала, но требует огромных вычислительных и трудозатрат;

2. метод, основанный на усредненных характеристиках;

3. метод, основанный на модели слоистого материала (Laminate method) на основе модели ортотропного материала. Композитный материал в данном подходе представляется пакетом однонаправленных слоев, с различными углами укладки друг относительно друга (рис. 1а). Каждый слой представляет собой ориентированный материал, армированный параллельными волокнами (рис. 16).



б

Рис. 1. Пример многослойного композита: а – пакет слоев, уложенных под различными углами, б – схема слоя, армированного непрерывными волокнами

В пакете программ ЛОГОС модель многослойного композитного материала основана на представлении композита как пакета слоев, уложенных под различными углами укладки и использовании теории оболочек при следующих предположениях [6, 9, 10]:

1. слоистый композитный материал рассматривается как неоднородный по материальным свойствам монолит;

 материал каждого слоя считается однородным и ортотропным, с осями упругой симметрии, направленными вдоль и поперек волокон;

3. деформации по толщине пакета непрерывны.

4. напряжения по толщине слоя непрерывны и связаны с деформациями уравнениями обобщенного закона Гука для плосконапряженного состояния оболочек.

Материал слоя характеризуется [11]:

1) упругими характеристиками:

— модулями упругости E_1 и E_2 вдоль и поперек волокон;

- модулем сдвига G₁₂ в плоскости волокон;

коэффициентом Пуассона v₁₂ в поперечном направлении;

2) прочностными характеристиками:

– разрушающими напряжениями σ_l^p и σ_l^{cm} при растяжении и сжатии вдоль волокон;

– разрушающими напряжениями σ_2^p и σ_2^{cm} при

растяжении и сжатии поперек волокон;

 – разрушающими напряжениями т₁₂ при сдвиге в плоскости волокон.

Эти характеристики определяются экспериментально и содержатся в базе данных материалов. Диаграммы деформирования всех ориентированных композитов при растяжении и сжатии вдоль волокон в первом приближении можно считать линейными вплоть до разрушения материала [11].

В пакете программ ЛОГОС реализована также возможность моделирования композитного материала посредством объемных элементов. В настоящее время в пакете программ ЛОГОС для моделирования композитного материала можно использовать:

 модель упругого деформирования однонаправленного слоя композитного материала с различными критериями разрушения [8, 9, 12];

– модели материалов, реализованные в пакете программ ЛОГОС [13], в том числе модели ортотропного или анизотропного материалов и различные критерии разрушения [14–15].

При использовании теории оболочек для каждого из слоев можно задать модель материала, толщину слоя и угол направления волокон.

Модель упругого деформирования однонаправленного слоя композитного материала на полимерной основе

Рассмотрим модель упругого деформирования однонаправленного слоя композитного материала [3, 6]. Рассмотрим слой, отнесенный к координатам 1, 2, 3, связанным с направлением армирования. Введем ортогональные координаты α , β , γ и предположим, что ось 1 армированного слоя составляет с осью α угол ϕ (рис. 2).



Рис. 2. Элемент однонаправленного слоя композита

Соотношения, связывающие напряжения и деформации в системах координат 1, 2, 3 и α , β , γ , имеют следующий вид:

$$\sigma_L = q^T \sigma q ;$$

$$\varepsilon_L = q^T \varepsilon q .$$

Тензоры напряжений и деформаций σ и ε относятся к системе координат α , β , γ . Тензоры напряжений и деформаций с индексом L (σ_L и ε_L) относятся к системе координат 1, 2, 3, связанной с направлением волокон.

Матрица преобразований *q* имеет следующий вид:

$$q = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0\\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с направлением волокон (1, 2, 3), определяются как $\sigma_L^{n+1} = \sigma_L^n + \Delta \sigma_L$, приращение компонент тензора напряжений в системе координат, связанной с направлением волокон (1, 2, 3), определяется согласно закону Гука:

$$\begin{split} &\sigma_1 = \overline{E}_1 \left(\varepsilon_1 + v_{21} \varepsilon_2 \right); \\ &\sigma_2 = \overline{E}_2 \left(\varepsilon_2 + v_{12} \varepsilon_1 \right); \\ &\tau_{12} = G_{12} \gamma_{12}. \\ &\overline{E}_1 = \frac{E_1}{1 - v_{12} v_{21}}, \quad \overline{E}_2 = \frac{E_2}{1 - v_{12} v_{21}}, \end{split}$$

где ε_1 , ε_2 , γ_{12} – компоненты тензора деформаций в направлениях 1, 2 и плоскости 12 соответственно, E_1 , E_2 – модули упругости в направлениях 1, 2, G_{12} – модуль сдвига в плоскости слоя, v_{12} , v_{21} – коэффициенты Пуассона.

Здесь имеет место условие симметрии упругих постоянных:

$$E_1 v_{21} = E_2 v_{12}$$

Для перехода между системами координат 1, 2, 3 и α , β , γ понадобятся также соотношения закона Гука в плоскостях, ортогональных плоскости армирования.

$$\tau_{13} = G_{13}\gamma_{13}, \quad \tau_{23} = G_{23}\gamma_{23}$$

где G_{13} и G_{23} , τ_{13} и τ_{23} , γ_{13} и γ_{23} – модули сдвига и компоненты тензора напряжений и деформаций в плоскостях 13 и 23 соответственно.

После вычисления новых значений компонент напряжений в системе координат, связанной с направлением волокон (1, 2, 3) они пересчитываются в систему координат элемента $\alpha, \beta, \gamma : \sigma = q \sigma_L q^T$.

Модель разрушения композитного материала с критерием Чанга

Модель композитного материала с критерием разрушения Чанга позволяет моделировать композитный материал с необязательным хрупким разрушением.

Данная модель включает следующие критерии [8, 9]:

• Критерий растяжения матрицы $\sigma_2 > 0$:

$$F_2^{\mathbf{p}} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^{\mathbf{p}}}\right)^2 + \overline{\tau} \ .$$

Если $F_2^p > 1$, то константы материала E_2 , G_{12} , v_{21} и v_{12} полагаются равными нулю.

• Критерий сжатия матрицы
$$\sigma_2 < 0$$
:

$$F_2^{\mathbf{c}\mathbf{\kappa}} = \left(\frac{\sigma_2}{2\sigma_{12}^*}\right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_2^{\mathbf{c}\mathbf{\kappa}}}{2\sigma_{12}^*}\right)^2 - 1\right] + \frac{\sigma_2}{\sigma_2^{\mathbf{c}\mathbf{\kappa}}} + \overline{\tau}$$

Если $F_2^{cm} > 1$, то константы материала E_2 , v_{21} и v_{12} полагаются равными нулю.

• Критерий растяжения вдоль волокон $\sigma_1 > 0$:

$$F_1^{\mathbf{p}} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^{\mathbf{p}}}\right) + \overline{\tau} .$$

Если $F_1^p > 1$, то константы материала E_1 , E_2 , G_{12} , v_{12} и v_{21} полагаются равными нулю.

Здесь
$$\overline{\tau}$$
 – сдвиговый член, $\overline{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_c^4};$

 σ_1^p – предел прочности при растяжении вдоль волокон, σ_2^p – предел прочности при растяжении поперек волокон, σ_{12}^* – предел сдвиговой прочности в плоскости 12, σ_2^{cm} – предел прочности при сжатии поперек волокон, α – параметр сдвигового напряжения для нелинейного члена.

Если для элемента в одном из слоев выполняется один из вышеперечисленных критериев разрушения, то напряжения в этом слое рассчитываются с учетом новых значений констант. Элемент считается разрушенным, если критерии разрушения выполнены во всех слоях, либо если выполнен критерий растяжения волокон хотя бы в одном из слоев.

Усовершенствованная модель разрушения

Усовершенствованная модель разрушения композитного материала дает возможность задавать критерии разрушения Чанга, а также дополнительные критерии разрушения:

Критерий растяжения матрицы $\sigma_2 > 0$:

$$F_2^{p} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^{p}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^{*}}\right)^2;$$

• Критерий сжатия матрицы $\sigma_2 < 0$:

$$F_{2}^{cw} = \left(\frac{\sigma_{2}}{2\sigma_{12}^{*}}\right)^{2} + \left[\left(\frac{\sigma_{2}^{cw}}{2\sigma_{12}^{*}}\right)^{2} - 1\right]\frac{\sigma_{2}}{\sigma_{2}^{cw}} + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^{*}}\right)^{2};$$

• Критерий растяжения вдоль волокон $\sigma_1 > 0$:

$$F_{l}^{p} = \left(\frac{\sigma_{l}}{\sigma_{2}^{p}}\right)^{2} + \beta\left(\frac{\sigma_{l2}}{\sigma_{l2}^{*}}\right);$$

• Критерий разрушения при сжатии вдоль воло-

Koh
$$\sigma_l < 0$$
: $F_l^{c_{\mathcal{K}}} = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_l^{c_{\mathcal{K}}}}\right)^2$.

Здесь σ₁^{сж} – предел прочности при сжатии вдоль волокон, β – весовой множитель сдвига при растяжении волокон.

Если $F_1^{cm} > 1$, то константы материала E_1 , v_{12} и v_{21} полагаются равными нулю. Для остальных критериев разрушения описание представлено выше.

• В усовершенствованной модели разрушения композитного материала есть возможность задать различные критерии разрушения по деформациям. Может быть задана максимальная деформация при растяжении или сжатии матрицы и максимальная деформация при сдвиге. При достижении этого значения элемент удаляется.

• В усовершенствованной модели разрушения композитного материала существует возможность использовать дополнительно:

– коэффициент разупрочнения для предела прочности волокна при растяжении (*f brt*): если

$$F_2^{c_{\mathcal{K}}} > 1$$
, to $\sigma_1^p = \sigma_1^p * f brt$.

- коэффициент уменьшения прочности волокна при сжатии (Y_{cfac}) : если $F_2^{cm} > 1$ то

 $\sigma_1^{c \varkappa} = \sigma_2^{c \varkappa} * Y_{cfac} \; .$

Элемент считается разрушенным, если:

• критерии разрушения выполнены во всех слоях;

 выполнен критерий растяжения вдоль волокон хотя бы в одном из слоев;

• достигнута величина максимальной деформации при растяжении или сжатии матрицы или достигнута величина максимальной деформация при сдвиге.

Тестовые расчеты Нагружение многослойной пластины

Цель данного теста – проверить работоспособность реализованного алгоритма расчета напряжений. Результаты расчета сравниваются с результатами расчета с моделью упругого материала.

Постановка задачи приведена на сайте <u>https://www.dynasupport.com/howtos/material/composit</u> <u>e-models</u>. Рассматривается задача о нагружении многослойной пластины. На рис. 3 схематично изображено расположение слоев задачи.



Рис. 3. Схематическая геометрия задачи

Задача представляет собой прямоугольную область 150×5 мм, толщина оболочки 18 мм. Счетная область разбивалась следующим образом: задавалось 30 элементов по оси X и 1 элемент по оси Y. В расчете использовался оболочечный элемент с 8-ю точками интегрирования по толщине и сдвиговым множителем равным 1. Толщина каждого из слоев 2,25 мм.

Для моделирования свойств материалов использовалась модель композитного материала. Физикомеханические характеристики материалов следующие.

Внешний слой: начальная плотность $\rho_0 = 2,7e-06 \text{ кг/мм}^3$, модули Юнга $E_1 = E_2 = 73,4 \text{ ГП a}$, коэффициент Пуассона $v_{21} = 0,32$, модули сдвига $G_{12} = G_{23} = G_{31} = 27,8 \text{ ГП a}$.

Внутренний слой: начальная плотность $\rho_0 = 6,3e-07$ кг/мм³, модули Юнга $E_1 = E_2 = 0,286$ ГПа, коэффициент Пуассона $v_{21} = 0,3$, модули сдвига $G_{12} = G_{23} = G_{31} = 0,11$ ГПа.

Левый конец оболочки жестко закреплен. Верхняя и нижняя границы – жесткие стенки.

К поверхности оболочки приложено давление, возрастающее от 0 в начальный момент времени, до 0,015 ГПа к моменту окончания расчета t = 5 мс.

На рис. 4 приведена зависимость смещения по оси Z правой границы от времени. Как видно из результатов до разрушения материал ведет себя как упругий.



Рис. 4. Зависимость смещения по оси Z правой границы от времени

Растяжение вдоль волокон

Цель следующих тестов – проверить работоспособность реализованных критериев разрушения и принципов моделирования поведения поврежденного материала.

Постановка задачи взята из работы [12]. На рис. 5 показана геометрия тестовой задачи, представляющая собой квадратный элемент 0,01×0,01 мм. В расчете использовался оболочечный элемент с одной точкой интегрирования по толщине и сдвиговым множителем равным 1.



Рис. 5. Начальная геометрия задачи, закрепленные узлы и приложенная нагрузка

Для моделирования свойств материала использовалась усовершенствованная модель разрушения композитного материала [9–10]. Физикомеханические характеристики материала следующие: начальная плотность $\rho_0 = 1,65$ г/см³, модули Юнга $E_1 = 80$ ГПа, $E_2 = 15$ ГПа, коэффициент Пуассона $v_{21} = 0,3$, модуль сдвига $G_{12} = G_{31} = G_{23} = 11,5$ ГПа. Параметры разрушения: $\sigma_1^p = 0,8$ ГПа, $\sigma_{12}^* = 0,1$ ГПа, максимальная деформация при растяжении $\varepsilon_f^p = 0,02$.

Задавались следующие граничные условия (рис. 5): один конец элемента жестко закреплен. На другом конце задана постоянная скорость вдоль оси Ох 0,01 км/с.

На рис. 6 приведены результаты, полученные по ПМ ЛОГОС ПА, в сравнении с результатами из работы [12]. Элемент растягивается в направлении волокон, пока напряжение в направлении волокон не достигнет максимального значения $\sigma_1^p = 0,8$ ГПа. После этого напряжение остается постоянным до тех пор, пока деформация не достигнет максимального значения при растяжении $\varepsilon_f^p = 0,02$. После этого элемент разрушается.



Рис. 6. Зависимость напряжений от деформаций в случае растяжения вдоль волокон

Растяжение вдоль волокон и сжатие матрицы

Постановка задачи взята из работы [12]. На рис. 7 показана геометрия тестовой задачи, пред-

ставляющая собой квадратный элемент $0,01 \times 0,01$ мм. В расчете использовался оболочечный элемент с одной точкой интегрирования по толщине и сдвиговым множителем равным 1.



Рис. 7. Начальная геометрия задачи, закрепленные узлы и приложенная нагрузка

Для моделирования свойств материала использовалась усовершенствованная модель разрушения композитного материала. Физико-механические характеристики материала следующие: начальная плотность $\rho_0 = 1,65 \text{ г/см}^3$, модули Юнга $E_1 = 80 \text{ ГПа}$, $E_2 = 15 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $v_{21} = 0,3$, модули сдвига $G_{12} = G_{31} = G_{23} = 11,5 \text{ ГПа}$. Параметры разрушения: $\sigma_1^{\text{р}} = 0,8 \text{ ГПа}$, $\sigma_1^{\text{сж}} = 0,5 \text{ ГПа}$, $\sigma_2^{\text{р}} = 0,045 \text{ ГПа}$, $\sigma_2^{\text{сж}} = 0,08 \text{ ГПа}$, $\sigma_{12}^* = 0,1 \text{ ГПа}$, f brt = 0,5.

Элемент растягивался вдоль направления волокон с постоянной скоростью 0,01 км/с и сжимался поперек направления волокон с постоянной скоростью 0,03 км/с.

На рис. 8 приведены результаты, полученные по ПМ ЛОГОС ПА, в сравнении с результатами из работы [12]. Сначала выполняется критерий сжатия матрицы на момент времени t = 0,002. Далее, т. к. задан



Рис. 8. Зависимость напряжений от времени

коэффициент разупрочнения для предела прочности волокна при растяжении *f brt*, пересчитывается величина $\sigma_l^p = \sigma_l^p * f brt = 0, 4 \Gamma \Pi a$. Элемент растягивается в направлении волокон, пока напряжение в направлении волокон не достигнет значения $\sigma_l^p = 0, 4 \Gamma \Pi a$. После этого элемент разрушается. Как видно из результатов, представленных в работе [12], элемент разрушается не сразу. Происходит постепенное повреждение элемента, с последующим его удалением. Алгоритм данного процесса не представлен в изученных авторами работах. В настоящее время данный алгоритм разрабатывается.

Сжатие вдоль волокон и сжатие матрицы

Постановка задачи взята из работы [12] и аналогична постановке предыдущей задачи. Отличие только в том, что элемент в направлении волокон сжимается и задан коэффициент уменьшения прочности волокна при сжатии $Y_{cfac} = 3$.

На рис. 9 приведены результаты, полученные по ПМ ЛОГОС ПА, в сравнении с результатами из работы [12]. Сначала выполняется критерий сжатия матрицы. Далее, т.к. задан коэффициент уменьшения прочности волокна при сжатии Y_{cfac} , пересчитывается величина $\sigma_1^{cm} = \sigma_2^{cm} * Y_{cfac} = 0,24$ ГПа. Элемент сжимается вдоль волокон, пока напряжение в направлении волокон не достигнет значения 0,24 ГПа. После этого напряжение остается постоянным.



Рис. 9. Зависимость напряжений от времени

Нагружение пластины с перекрестнонаправленными слоями

Цель данного теста – проверить работоспособность реализованного алгоритма расчета напряжений в случае разнонаправленных слоев.

Постановка задачи взята из работы [17]. Геометрия представляет собой квадратную пластину длиной 1 мм. В расчете использовался оболочечный элемент с тремя точками интегрирования по толщине (0°, 90°, 0° – направление волокон в слоях) и сдвиговым множителем равным 0,83. Толщина оболочки 0,1 мм. Для моделирования свойств материала использовалась модель разрушения композитного материала. Физико-механические характеристики материала следующие: $E_1 = 25$ МПа, $E_2 = 1$ МПа, $v_{12} = v_{13} = v_{23} = 0,25$, $G_{12} = G_{31} = 12,5$ МПа, $G_{23} = 5$ МПа. Края оболочки жестко закреплены. К поверхно-

сти оболочки приложено давление 0,001 МПа. В таблице приведены результаты, полученные по ПМ ЛОГОС ПА, в сравнении с результатами из работы [17].

Смещение центральной точки

Точное решение [17]	Расчет ЛОГОС-ПА	Расчет [17]
0,6697	0,656	0,6773

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2011.

2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Журнал ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2018. Вып. 1. С. 3–13.

3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988.

4. Протасов В. Д. Механика в машиноведении композитных конструкций. – Механика композитных материалов, 1987. С. 490–493.

5. Работнов Ю. Н. Механика твердых тел и композиционных материалов – Вестник АН СССР, № 3, 1965, с. 33–38; Механика композитов, Вестник АН СССР, 1979. № 5. С. 50–58.

6. Абросимов Н. А. Методика построения разрешающей системы уравнений динамического деформирования композитных элементов конструкций. Учебно-методическое пособие. Н. Новгород: 2010. С. 40.

 Скворцов Ю. В. Механика композиционных материалов. Конспект лекций по дисциплине. Самара: 2013. 8. Григолюк Э. И., Куликов Г. М. Многослойные армированные оболочки: Расчет пневматических шин. – М.: Машиностроение, 1988. С. 288.

9. Hallquist J. O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006.

10. Hallquist J. O. LS-DYNA keyword user's manual. Volume 1. Livermore Software Technology Corporation, 2009.

11. Композиционные материалы: справочник / под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнопольского. - М.: Машиностроение, 1990.

12. Xiahua Zheng. Nonlinear strain rate dependent composite model for explicit finite element analysis. A dissertation presented to the graduate faculty of the University of Akron. 2006.

13. Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Симонов Г. П., Циберев К. В., Шувалова Е. В. Результаты верификации моделей упругопластического деформирования и разрушения, реализованных в пакете программ ЛЭГАК-ДК. // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XII международного семинара. Саров, 11–15 октября, 2010.

14. Ромащенко В. А. Оценка прочности композитных и металлокомпозитных цилиндров при импульсном нагружении. Сообщение 1. Правила выбора и сравнительный анализ различных критериев прочности анизотропного материала // Проблемы прочности 2012. № 4. С. 42–57.

15. Радченко П. А., Радченко А. В. Влияние применения различных критериев прочности на поведение анизотропных материалов при динамическом нагружении. Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика [Электронный ресурс] / Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160, режим доступа: http://conf.nsc.ru/niknik-90/reportview/40002, свободный. Загл. с экрана (дата обращения: 17.09.2015).

16. Радченко П. А., Балохонов Р. Р., Радченко А. В. Влияние высокопрочного покрытия, нанесенного газоплазменным напылением, на разрушение стальной подложки при ударе // Современные проблемы науки и образования. – 2012. № 6; URL: www.science-education.ru/ 106-7871 (дата обращения: 17.09.2015).

17. Nguyen-Van H., Mai-Duy N. Tran-Cong T. Analysis of laminated composite plate/shell structures using a stabilized nodal-intagrated quadrilateral element $// 1^{st}$ International Conference on Modern Design, Construction and Maintenance of Structures. Hanoi, Vietnam, 10-11 December, 2007.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО МЕХАНИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТЕНДЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС

<u>А. Е. Павлунина,</u> С. М. Герцик, С. А. Краюхин

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

Введение

На сегодняшний день использование современных систем автоматизированного инженерного анализа является наиболее эффективным способом оценки прочности, прогнозирования долговечности и оптимизации конструкций. Это связано с известными преимуществами этих методов перед натурным экспериментом, быстрым развитием средств вычислительной техники и её математического обеспечения, а также с совершенствованием существующих и разработкой новых численных методов.

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка пакета программ (ПП) численного моделирования ЛОГОС [1]. Развитие данного пакета особенно актуально в свете санкционной политики ряда государств в отношении России и в рамках программы импортозамещения. Данный пакет позволяет моделировать задачи аэрогидромеханики, теплопроводности, модального анализа и прочности, в т.ч. задачи высокоскоростного и низкоскоростного удара.

В рамках данной работы ПП ЛОГОС применяется для моделирования механического поведения элементов оснастки испытательной установки и габаритно-весового макета прибора (объекта исследования – ОИ) при высокоинтенсивном нагружении.

Цель и объект исследования

Для испытания некоторых приборов и узлов на действие интенсивных механических нагрузок применяется стенд динамических испытаний (СДИ)[2], состоящий из контейнера с установленным в него объектом исследования и разгонного устройства, выполненного на основе короткоствольной пороховой баллистической установки.

Объектом исследования (ОИ) является габаритно-весовой макет прибора. ОИ оснащен ударостойким регистратором ускорений АПРУУ[3].

Механическое нагружение ОИ осуществляется в процессе разгона контейнера в стволе разгонного устройства СДИ под действием давления пороховых газов на торец штока, обеспечивающего параметры виброударного режима нагружения ОИ. После выхода из ствола разгонного устройства контейнер с ОИ скользит по рельсовой направляющей и тормозится под действием сил трения и аэродинамического сопротивления. Схема контейнера для случая осевого нагружения ОИ представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема контейнера: 1 – ОИ; 2 – корпус; 3 – кольцо; 4 – плита; 5 – датчик ускорений; 6 – основание;7 – шток; 8 – башмак

Целью работы является моделирование опыта на СДИ в ПП ЛОГОС.

Основные задачи: прогноз напряженнодеформированного состояния (НДС) элементов оснастки испытательной установки, определение ускорений ОИ, сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Рассматриваются осевой и боковой варианты нагружения ОИ.

Построение расчетных моделей

Геометрические и конечно-элементные модели части контейнера с ОИ в испытательной оснастке для случаев осевого и бокового нагружения представлены на рис. 2.

Для экономии вычислительных ресурсов датчик ускорений (5), шток (7) и башмак (8) (см. рис. 1) не моделируются.

При построении расчетных моделей применяются гексаэдрические и тетраэдрические линейные конечные элементы с одной точкой интегрирования. Общая размерность задачи составляет 213 585 элементов сплошной среды (осевое нагружение) и 639 329 элементов сплошной среды (боковое нагружение).

Для расчета НДС конструкции используются билинейные упругопластические модели материалов с изотропным упрочнением.

Резьбовые соединения, а также крепление разьемов на крышке моделируются контактом типа «склейка». Для описания взаимодействия остальных элементов конструкции между собой в расчете используется автоматический контакт.

Задача решается в лагранжевой постановке с применением явной схемы интегрирования по времени.

В качестве начальных условий принята экспериментальная зависимость ускорения от времени, которая в расчетной модели задается вузлах торца основания.

В силу симметрии конструкции и нагрузок рассматривается половина модели с приложением соответствующих граничных условий на плоскости симметрии.

В расчетах учитывается затяжка резьбового кольца, которое фиксирует ОИ в корпусе. Для этого применяется специальный механизм получения предварительного НДС, реализованный в ЛОГОС, именуемый динамическая релаксация. Для получения НДС конструкции с учетом затяжки резьбовое кольцо смещается вглубь детали, с которой она не-



Прибор регистрации ударного ускорения (АПРУУ)



Рис. 2. Геометрические и конечно-элементные модели части контейнера с ОИ в испытательной оснастке: а – для осевого нагружения; б – для бокового нагружения

посредственно контактирует при затяжке. На этапе динамической релаксации к контактирующим поверхностям прикладывается контактная сила, зависящая от величины взаимопроникания деталей и времени, также на каждом шаге по времени узловые скорости всех частей модели умножаются на коэффициент меньше единицы, что приводит к затуханию возможных колебаний. Когда максимальное изменение узловых скоростей относительно предыдущего шага становится меньше критерия сходимости, считается, что в конструкции достигается статическое равновесие и на этом этап динамической релаксации завершается. Полученное НДС является исходным для дальнейшего расчета.

Результаты расчета при осевом нагружении объекта исследования, сравнение с экспериментом

На рис. 3 представлены графики зависимости ускорения от времени центра масс регистратора АПРУУ, полученные в расчете и эксперименте. Из рис. З видно, что экспериментальный и расчетный графики ускорений качественно хорошо согласуются, различие по максимальным значениям ускорения, полученным в расчете и эксперименте, составляет ~9 %.

На рис. 4 представлены результаты расчета НДС испытательной оснастки при нагружении ОИ в осевом направлении в виде полей эквивалентных по Мизесу напряжений в момент экстремального НДС конструкции. Напряжения в конструкции не превышают предела прочности материала В95, который является наименее прочным материалом в конструкции.

Результаты расчета при боковом нагружении объекта исследования, сравнение с экспериментом

На рис. 5 представлены графики зависимости ускорения от времени центра масс регистратора АПРУУ, полученные в расчете и эксперименте.



Рис. 3. Графики зависимости ускорения от времени центра масс АПРУУ (осевое нагружение ОИ)



Рис. 4. Поля эквивалентных по Мизесу напряжений (кгс/мм²) в испытательной оснастке (осевое нагружение ОИ)



Рис. 5. Графики зависимости ускорения от времени центра масс АПРУУ (боковое нагружение ОИ)



Рис. 6. Поля эквивалентных по Мизесу напряжений (кгс/мм²) в испытательной оснастке (боковое нагружение ОИ)

Из рис. 5 видно, что экспериментальный и расчетный графики ускорений качественно хорошо согласуются, различие по максимальным значениям ускорения, полученным в расчете и эксперименте, составляет ~6 %.

На рис. бпредставлены результаты расчета НДС испытательной оснастки при нагружении ОИ в боковом направлении в виде полей эквивалентных по Мизесу напряжений в момент экстремального НДС конструкции. Напряжения в конструкции не превышают предела прочности материала В95, который является наименее прочным материалом в конструкции.

Заключение

В рамках данной работы была проведена серия расчетов по определению динамики и прочности габаритно-весового макета прибора при высокоинтенсивном нагружении.

Для расчетов применялся отечественный пакет программ численного моделирования ЛОГОС, разрабатываемый во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Выполнено сравнение результатов проведенных расчетов с экспериментальными данными.

В обоих случаях нагружения расчетные графики ускорений качественно хорошо согласуются с экспериментальными. Различие максимальных расчетных ускорений от экспериментальных для осевого случая нагружения ОИ составило ~9 %, для бокового ~6 %.

Полученные данные позволяют сделать вывод о применимости ПП ЛОГОС для решения задач подобного класса с приемлемой для инженерных расчетов точностью.

Литература

1. www.vniief.ru

2. Иванова О. В., Краюхин С. А., Михайлов И. А. и др. Стенд динамических испытаний. Патент РФ на изобретение № 2467300, опубл. 20.11.2012, бюл. № 32.

3. Прибор регистрации ударного ускорения АПРУУ2. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.046.А № 55526 от 06.11.2014.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И. В. Серякова, А. М. Гельберг, Д. Ю. Дьянов

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

Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка отечественного многофункционального пользовательского пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования для высокотехнологичных отраслей промышленности (далее – пакет программ (ПП) «ЛОГОС») [1–2]. Одной из составных частей ПП «ЛОГОС» является программный модуль для моделирования прочности (далее – ЛОГОС-ПА).

Одним из условий успешного внедрения ПП «ЛОГОС» в полный цикл разработки изделий на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности является наличие в ЛОГОС-ПА функциональных возможностей для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности.

В данном докладе представлено описание набора методов и алгоритмов для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности. Необходимость реализации модели железобетона в ПП ЛОГОС-ПА была обусловлена потребностью учитывать различные воздействия на железобетонные конструкции при решении динамических задач прочности, в частности – воздействия снарядов на железобетонные преграды, падение тяжелого пассажирского самолёта на контаймент АЭС, и т. д.

Для демонстрации работоспособности реализованных функциональных возможностей для моделирования железобетонных конструкций в докладе представлены результаты численного расчета тестовых задач, проведенного с использованием ПП ЛОГОС-ПА.

Описание модели бетона Джонсона – Холмквиста

Одной из моделей, используемых в промышленности при решении задач является модель бетона Джонсона – Холмквиста [3–4]. Её можно применять к бетону, испытывающему большие деформации со значительной скоростью и высокое давление.

Данная модель использовалась при моделировании железобетона, поэтому приведем краткое описание данной модели. Давление *р* в материале задаётся кусочнонепрерывной функцией от объёмной деформации $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$:

$$P(\mu) = \begin{cases} P_{crush} \cdot \mu, & \mu \leq \mu_{crush} \\ \frac{P_{lock} - P_{crush}}{\mu_{lock} - \mu_{crush}} \cdot (\mu - \mu_{crush}) + P_{crush}, & \mu_{crush} < \mu < \mu_{lock}^{*} \\ K_{1} \cdot \overline{\mu} + K_{2} \cdot \overline{\mu}^{2} + K_{3} \cdot \overline{\mu}^{3}, & \mu \geq \mu_{lock}^{*} \end{cases}$$

$$(1)$$

где $\overline{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}$, а μ^*_{lock} находится как решение

третьего уравнения для $p(\mu) = P_{lock}$:

$$\frac{\mu_{lock}^{*} - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \cdot K_{1} + \left(\frac{\mu_{lock}^{*} - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}\right)^{2} \cdot K_{2} + \left(\frac{\mu_{lock}^{*} - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}\right)^{3} \cdot K_{3} - P_{lock} = 0$$

$$(2)$$

В случае растяжения давление считается по формуле

$$P(\mu) = \frac{p_{crush}}{\mu_{crush}} \cdot \mu , \qquad (3)$$

однако оно не может опускаться ниже значения T(1-D), где D – мера поврежденности материала. K_1 , K_2 , K_3 , μ_{crush} , p_{crush} , μ_{lock} , p_{lock} , T – задаваемые пользователем параметры материала.

Величина объемного модуля бетона Джонсона – Холмквиста зависит от того, в какой зоне давления он находится – упругой, так называемой зоне компактации пор или в зоне абсолютно плотного материала

$$K(\mu) = \begin{cases} K_0, \quad K_0 = \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}}, \quad \mu \le \mu_{crush} \\ K_a, K_a = (1 - D_c) \cdot K + D_c \cdot K_1, \\ \mu_{crush} < \mu < \mu_{lock}^* \\ K_1, \quad \mu \ge \mu_{lock}^* \end{cases}$$
(4)

где $D_c = \frac{\mu^p}{\mu_{lock}}$.

Предел текучести зависит от скорости деформации є и меры поврежденности

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p + \Delta \mu^p}{\varepsilon_f}, \qquad (5)$$

принимающей значения от 0 до 1, где $\Delta \mu^{p}$ – приращение объемной пластической деформации, соответствующее раздавливанию и схлопыванию на каждом шаге по времени после превышения объёмной деформацией μ значения μ_{crush} , $\Delta \varepsilon^{p}$ – сдвиговая пластическая деформация, D_{1} и D_{2} – константы материала, а $T^{*} = \frac{T}{FC}$ – нормализованное максимальное гидростатическое давление.

Объёмная пластическая деформация находится как разность между объёмной деформацией µ и упругой объёмной деформацией µ^e:

$$\mu^p = \mu - \mu^e. \tag{6}$$

Объемная деформация находится с помощью давления и объёмного модуля:

$$\mu^e = \frac{P}{K} \tag{7}$$

Нормализованное эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений, отнесенная к квазистатической прочности на одноосное сжатие) задается формулой

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{FC'}, \qquad (8)$$

где σ – фактическое эквивалентное напряжение, а FC – прочность при квазистатическом одноосном сжатии.

Поверхность прочности после разрушения рассчитывается редуцированием значения когезионных сил (сил сцепления) начальной поверхности разрушения. Таким образом, при трещинообразовании предел текучести снижается и для полностью разрушенного сжатием материала имеет вид

$$\sigma^* = BP^{*N} \left[1 + Cln \dot{\varepsilon}^* \right]. \tag{9}$$

Методы моделирования железобетона

Железобетон традиционно рассматривается как композиционный материал, состоящий из двух совместно работающих моделей материалов: бетона и стали. В конечно-элементных расчетах можно выделить следующие технологии моделирования арматуры в железобетоне [5]:

 а) дискретная – узлы балочных элементов для арматуры совпадают с узлами объемной конечноэлементной сетки для бетона;

б) встроенная – узлы сеток арматуры и бетона не совпадают, но связаны уравнениями совместности;

в) распределенная – предполагается, что арматура равномерно распределена по элементам конечно-элементной сетки для бетона.

Моделирование железобетона методом встроенной арматуры

Арматурные стержни и бетон моделируются с помощью балочных элементов и элементов сплошной среды, соответственно. Сетка для арматуры из балочных элементов находится внутри сетки элемента сплошной среды. Каждая из них имеет свое собственное независимое движение. Метод кинематических ограничений – способ, по которому соединяются эти две сетки [6].

В связывании с ограничениями подразумевается две области – главная (элементы сплошной среды) и подчиненная (балочные элементы).

Обычно и скорость, и ускорение должны быть ограничены. Ограничение первого обеспечивает сохранение импульса, второго – баланс сил. Алгоритм является одинаковым и для скорости и для ускорения, поэтому приведем дальнейшее обсуждение только для скорости.

На начальном этапе имеем несогласованное поле скоростей. Узлы балки являются подчиненными и обозначаются с помощью строчных (маленьких) букв; узлы твердого элемента являются главными и обозначаются с помощью прописных (заглавных) букв.

Первый шаг метода кинематических ограничений заключается в том, что узлы подчиненной области распределяют свою узловую массу и импульс в узлы главной области.

Второй шаг состоит в обновлении узловых скоростей главного элемента с помощью деления нового импульса на новую массу.

Далее осталось ограничить скорость в подчиненных узлах, с помощью интерполирования скорости из узлов главной области.

Таким образом, имеем подчиненные узлы, которые движутся точно так же, как и главные. Схема процесса показана на рис. 1.



Рис. 1. Метод кинематических ограничений



Рис. 1. Блок-схема алгоритма на начальный момент времени

В качестве иллюстрации работы программы далее приведены блок-схемы организации расчетного алгоритма для моделирования метода кинематических ограничений. На рис. 2 блок-схема демонстрирует последовательность действий на начальный момент времени. На рис. 3 приведен алгоритм действий, работающий уже в процессе счета на каждом шаге по времени.

Особенности реализации

В реальных задачах узлы балки не всегда располагаются так хорошо, что все элементы сплошной среды содержат в себе хотя бы один узел балочного элемента. Если балка пересекает какой-нибудь элемент сплошной среды и в него не попали узлы балки, то этот элемент не получит никакого распределения от балки, и алгоритм не выполнится.

Таким образом, необходимо ставить дополнительные «точки соединения» между двумя конечными узлами балки. Схема расположения таких узлов представлена на рис. 4.

Каждый узел балки имеет свою узловую массу и узловую скорость. Эти два факта являются «физическими». Но для искусственно созданных «точек соединения», таких свойств нет. Для скорости это решается довольно просто. Предполагается, что скорость в «точке соединения» должна быть интерполирована из конечных точек балки.

Чтобы решить проблему с массой, воспользуемся приемом, который называется «мостовое соелинение». Балка делится на подчиненную и главную. Подчиненная балка строится в промежутке между связью узлов главной балки и элемента сплошной среды. Теперь получается два соединения. Первое соединение между подчиненными и главными узлами балочного элемента; второе – между подчиненными узлами балочного элемента и сеткой элемента сплошной среды. Подчиненная балка служит «мостом», соединяющим реальную балку и элементы сплошной Данная концепция среды. показана на рис. 5.

Масса в точках соединения принимает значение узловой массы подчиненной балки. Это обеспечивает физический смысл и теоретически правильно. Точка соединения имеет свою скорость, ограниченную с помощью узлов элемента сплошной среды в соответствии с методом кинематических ограничений, описанным выше.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма на каждом шаге по времени



Рис. 2. Схема распределения точек соединения



Рис. 5. Схема «мостового соединения»



Рис. 6. Начальная геометрия бетонной преграды и стального ударника



Рис. 3. График зависимости скорости ударника от времени

Тестовые расчеты

Пробитие бетонной преграды стальным ударником

Начальная геометрия представлена на рис. 6. Для ударника использовалась модель кусочнолинейного упругопластического материала со следующими параметрами: плотность $\rho = 8020$ кг/м³, модуль Юнга $Y_0 = 1.72$ ГПа, коэффициент Пуассона 0.3, пластическая деформация разрушения 1,5.

На рис. 7 представлены результаты расчёта при начальных скоростях ударника $V_0 = 606$ м/с и $V_0 = 749$ м/с.

На рис. 8 представлены пластические деформации на момент вылета ударника из бетонной преграды, полученные с помощью ПП ЛОГОС-ПА.

Сравнение полученных скоростей с экспериментальными данными [7] представлено в таблице.

	Эксперимен- тальные зна- чения, м/с	Результаты ЛОГОС-ПА, м/с	Погреш ность, %
$V_0 = 606 \text{ m/c}$	449	479	6,7
$V_0 = 749 \text{ m/c}$	615	601	2,3

Результаты расчетов

<u>Пробитие железобетонной преграды стальным</u> <u>ударником</u>

Конечно-элементная модель представлена на рис. 9. Арматурные стержни моделируются балочными элементами с упругопластическим материалом, для бетона используется модель Джонсона – Холмквиста. Скорость ударника 400 м/с.

На рис. 10 представлены пластические деформации на конечный момент времени ударника из железобетонной преграды, полученные с помощью программного модуля ЛОГОС-ПА.

Заключение

В работе представлено описание подходов и алгоритмов для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности. В частности, подробно описан метод встроенной арматуры. Преимуществом данного метода является применение ограничений между двумя наборами узлов, один набор для балочных элементов и один набор для элементов сплошной среды. Таким образом, не появляется проблем с сеткой как в дискретных моделях железобетона, где присутствуют общие узлы, а также не нужно создавать неоднородные модели материала (композиты) как в распределенных моделях.



Рис. 8. Пластические деформации на момент вылета ударника из плиты



Рис. 4. Конечно-элементная модель



Рис. 5. Пластические деформации на конечный момент времени

Приведена программная реализация метода встроенной арматуры для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности в программном модуле для моделирования задач прочности пакета программ «ЛОГОС».

Также в работе представлены тестовые расчеты, демонстрирующие работоспособность представленных алгоритмов.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М.В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю.В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» -Саров, 2011.

2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В.Ф., Циберев К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2018. Вып. 1, стр. 3–13.

3. Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures I Proc. 14th Int. Symp. Ballistics. Quebec City, Canada, 26–29 September, 1993. Vol. 2. P. 591–600.

4. Meyer C. S. Development of Geomaterial Parameters for Numerical Simulations Using the Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Model For Concrete» // Weapons and Materials Research Directorate, June 2011.

5. Лукин А. В., Модестов В. С. Конечноэлементное моделирование и анализ напряженнодеформированного состояния железобетонных конструкций // Санкт-Петербургский государственный политех нический университет. – 2014.

6. Hao Chen, An introduction to «*Constrained_ beam_in_solid» // FEA Information Engineering Journal, February 2017.

7. Hanchak S. L., Forrestal M. J., Young E. R., Ehrgott J. Q. Perforation of concrete slabs with 48 MPa and 140 MPa unconfined compressive strengths // Int. J. Impact Engng. 1992. Vol. 12. No. 1. P. 1–7.

СЕКЦИЯ 2

Экспериментальная физика

Председатели секции:

д-р физмат. наук	В. С. Гордеев
д-р физмат. наук	Ю. Б. Кудасов
д-р физмат. наук	Н. В. Житков
д-р физмат. наук	А. И. Лебедев

РАЗРАБОТКА КОММУТАТОРА МОЩНЫХ ДВУПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ С ОБРАТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

<u>А. Г. Арзев</u>, И. В. Галахов, Л. С. Ганин, А. В. Гришанин¹, В. В. Елисеев¹, Е. В. Ирешев, А. Ю. Кабанов, А. В. Креков, Е. В. Коженков, В. И. Лесков, В. А. Мартыненко¹, В. Г. Мускатиньев¹, В. А. Осин, С. А. Потапов¹, В. В. Свиридов, Д. А. Сеник, О. В. Фролов¹, А. А. Хапугин¹, М. В. Чистопольский

> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл. ¹ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск республика Мордовия

Введение

Для ряда импульсных технологий необходимо за времена от единиц до сотен микросекунд коммутировать мощные двуполярные импульсы тока с амплитудой в десятки и сотни килоампер. Одним из таких применений является высоковольтный коммутатор тока для системы предионизации импульсных ламп накачки неодимового лазера.

Предионизация повышает эффективность накачки и стабилизирует пусковые характеристики ламп [1]. Контур предионизации используется также для проверки (тестирования) ламп между срабатываниями. Коммутатор в данной системе представляет собой ключевой элемент контура предионизации модуля емкостного накопителя лазера. Он должен работать при напряжении 24 кВ и коммутировать два знакопеременных импульса тока амплитудой до 25 кА с длительностью около 200 мкс.

Известна возможность эффективного использования в режиме коммутации затухающих знакопеременных импульсов тока высоковольтного блока на основе реверсивно-включаемых динисторов (РВД), коммутирующего импульсы прямого тока, с соединенным к нему встречно-параллельно высоковольтного диодного блока, коммутирующего импульсы обратного тока [2].

В данной работе представлена новая версия реверсивно-включаемого динистора (РВДД), оптимизированного для коммутации мощных двуполярных импульсов тока и приведены результаты испытаний опытного образца РВДД-коммутатора в составе модуля накопителя энергии создаваемой в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки.

Полупроводниковый коммутатор тока на основе реверсивно включаемых динисторов с обратной проводимостью

Конструкция РВДД

Стандартный РВД, конструкция которого представлена на рис. 1а, предназначен для коммутации силовых импульсов тока только одной (положительной) полярности [2]. Область обратной проводимости этого прибора минимизирована и предназначена для управления прибором с помощью короткого импульса тока отрицательной полярности. Поэтому РВД имеет достаточно большие потери энергии при протекании силового тока в обратном направлении, обусловленные сравнительно высоким сопротивлением каналов обратной проводимости. Это обстоятельство до недавнего времени создавало определенные трудности при разработке мощных РВДкоммутаторов для электроразрядных технологий, предполагающих протекание знакопеременных импульсов тока.

Схема коммутатора с подключением параллельно к блоку РВД диодного блока, представленная в работе [2], значительно усложняется в связи с необходимостью принятия мер, исключающих перераспределение тока управления РВД в диодный блок.



Рис. 1. Конструкция: а – РВД, б – РВДД

Для решения этой проблемы была разработана конструкция реверсивно-включаемого динистора с обратной проводимостью (РВДД) (рис. 1б), обладающая уменьшенными потерями при протекании обратного тока [3]. Конструкция РВДД, представляет собой силовую интегральную схему, состоящую из тиристорных p⁺-n-p-n⁺-секций с закороченными шунтами анодным и катодным эмиттерами. В четырехслойную структуру встроены n⁺-n-p-p⁺-диоды цилиндрической формы (области 2 на рис. 1), включенные антипараллельно тиристорной структуре, а p⁺-эмиттер четырехслойной структуры дополнительно закорочен анодными n^+ -шунтами, образующими транзисторные n^+ -n-p- n^+ -секции (области 3), расположенные вокруг катодных эмиттеров встроенных диодов. В структуре РВДД можно условно выделить три зоны, ответственные за все этапы коммутации двуполярных импульсов тока:

1) секции (2+3) – коммутация тока управления (инжекция управляющей плазмы в n-область);

 секции (1+3) – включение динистора и коммутация мощного импульса прямого тока;

 секция (2) – коммутация мощного импульса обратного тока (инжекция управляющей плазмы в побласть).

В последнем режиме силовые импульсы обратного тока эффективно выполняют роль тока управления перед коммутацией многократно повторяющихся импульсов прямого тока.

Интегрированные диоды РВДД имеют значительно меньшие падения напряжения при протекании импульса тока обратной полярности по сравнению с квазидиодами в транзисторных секциях (3) и способны пропускать обратные токи, сопоставимые с прямыми импульсными токами. Количество равномерно распределенных по площади динистора инверсных диодов может составлять от 2 до 5 тысяч штук на одной Si пластине диаметром 50 мм. Изменяя соотношение площадей диодных и тиристорных секций, путем вариации диаметра и количества встроенных диодов, можно гибко менять максимально допустимые амплитуды положительных и отрицательных полуволн токов. Это позволяет оптимизировать конструкцию РВДД для разных режимов коммутации двуполярных импульсов тока с различными коэффициентами затухания.

РВДД-коммутатор

В ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) разработан и изготовлен опытный образец коммутатора на ток 50 кА и напряжение 25 кВ на основе РВДД, который позволяет исключить высоковольтный диодный блок и существенно упростить конструкцию коммутатора двуполярных импульсов тока. Внешний вид и принципиальная электрическая схема коммутатора показаны на рис. 2 [3].

Новый коммутатор представляет собой высоковольтную сборку, выполненную в виде последовательно соединенных 14-ти таблеточных РВДД диаметром 51 мм, к каждому из которых подключен шунтирующий резистор. Коммутатор управляется блоком запуска, который формирует короткий импульс тока обратной полярности, включающий РВДД управляющим плазменным слоем по реверсивно-инжекционному механизму. После включения коммутатора через него протекают импульсы прямого и обратного тока. Импульсы тока обратной полярности коммутируются в блок РВДД через интегрированные в кремниевые структуры РВДД инверсные диоды, обеспечивая при этом эффективное управление РВДД к моменту коммутации импульсов прямого тока. В результате с помощью высоковольтного блока РВДД в цепь нагрузки коммутируются мощные слабозатухающие двуполярные импульсы тока.



Рис. 2. РВДД-коммутатор: а – внешний вид с блоком запуска: 1 – запускающие конденсаторы; 2 – сборка РВДД; 3 – сборка тиристоров в составе блока запуска РВДД; 4 – блок управления с интерфейсом; б – принципиальная электрическая схема: C1,C2 – запускающие конденсаторы; VS1-VS14 – сборка РВДД; VS15-VS28 – сборка тиристоров в составе блока запуска РВДД; блок управления с интерфейсом

Испытания РВДД-коммутатора в составе модуля накопителя лазерной установки

Экспериментальный стенд

Исследование коммутационных возможностей и начальные испытания РВДД-коммутатора проходили

на стенде в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) в разрядном контуре модуля емкостного накопителя энергии лазерной установки [4]. В таблице приведены основные параметры экспериментального стенда.

Принципиальная электрическая схема стенда представлена на рис. 3 [4].

Основные парам	етры экспериментального стег	нда
----------------	------------------------------	-----

Параметр	Значение
Напряжение заряда накопительных конденсаторов, кВ	1025
Суммарная емкость модуля накопителя энергии, мкФ	~3000
Емкость конденсатора предионизации, мкФ	75
Максимальная запасаемая энергия при U _{зар} = 24 кВ, кДж	864
Количество разрядных цепей модуля накопителя	10
Сопротивление нагрузки единичной разрядной цепи, Ом	~0,5 (омический эквивалент)
Сопротивление резистора в цепи предионизации, Ом	0,5
Максимальная амплитуда тока через коммутатор предионизации, кА	25
Максимальная амплитуда тока через основной коммутатор, кА	250
Длительность импульса тока предионизации (по уровню 0,1 амплитуды), мкс	~120
Длительность импульса силового тока (по уровню 0,1 амплитуды), мкс	450500



Рис. 3. Принципиальная электрическая схема высоковольтного стенда: C1-C10 – накопительные конденсаторы основного разрядного контура; Ко – силовой коммутатор; Lo, Ln1 – дроссели с насыщающимися сердечниками; Уро, УРп – устройства размагничивания дросселей с насыщающимися сердечниками; Д1, До – диоды; Сп – конденсатор предионизации; Кп – коммутатор предионизации; L1-L10 – токоформирующие индуктивности; Rэ1-Rэ10 – резистивные эквиваленты нагрузки; КН1-КН10 – высоковольтные кабели; ГЗОК – генератор запуска основного коммутатора; ГЗКП – генератор запуска коммутатора предионизации; R3.1-R3.10 – зарядные резисторы; Rp.1-Rp.10 – разрядные резисторы; Rp.п. – разрядный резистор конденсатора предионизации; R3.1-Rд.10 – дополнительные резисторы; Rn1 – согласующий резистор предионизации; R1, R2 – резисторы; ЗУ – зарядное устройство; K1-K3 – высоковольтные переключатели; K4 – многоконтактный замыкатель; ЛУСС – линейное устройство системы синхронизации; ПР1-ПР15 – датчики тока (пояса Роговского); ДН1,ДН2 – делители напряжения

Модуль работает в двух режимах. В тестовом режиме предварительно заряженный конденсатор Сп с помощью коммутатора предионизации Кп разряжается в нагрузку Rэ1...Rэ10. В основном режиме заряжены конденсаторы С1...С10, и при срабатывании коммутаторов Кп и Ко с разновременностью около 250 мкс (Ко срабатывает с задержкой) в нагрузке формируются два импульса тока. При этом через Кп протекают импульсы тока: первый – ток заряда конденсатора Сп по цепям единичных контуров модуля и нагрузки, второй – через ~250 мкс ток разряда конденсатора Сп по цепи включенного коммутатора Ко.

Запуск коммутатора предионизации осуществлялся с помощью генератора ГЗКП, построенного по схеме с перезарядом дополнительной емкости и индуктивным накопителем энергии.

Для обеспечения временной задержки (около 1 мкс), требуемой для нормального запуска РВД-коммутатора Кп, последовательно с Кп включен насыщающийся дроссель Ln1.

При испытаниях РВДД-коммутатора предионизации в качестве нагрузки модуля накопителя использовался омический эквивалент с сопротивлением около 0,5 Ом в одном разрядном контуре. Данная величина близка к сопротивлению штатных импульсных ламп накачки создаваемого лазера.

Результаты испытаний

Испытания РВДД-коммутатора проводились при зарядном напряжении 24 кВ в тестовом и основном режимах. В тестовом режиме всего было проведено 80 срабатываний, а в основном режиме – 200 срабатываний. Пауза между испытаниями составляла 10 мин. Перед каждым срабатыванием размагничивался сердечник дросселя Ln1.

Фотография РВДД-коммутатора предионизации, установленного на испытательном стенде, приведена на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид РВДД-коммутатора в составе высоковольтного стенда

При испытаниях в каждом включении с помощью поясов Роговского регистрировались импульсы токов: поясом ПР14 – ток в цепи предионизации (в коммутаторе Кп), поясом ПР13 – ток запуска РВДДкоммутатора и поясами ПР11, ПР12 – токи в цепи силового РВД-коммутатора. Для регистрации сигналов использовались цифровые запоминающие осциллографы. Характерные осциллограммы токов запуска и силового тока РВДД-коммутатора в тестовом и основном режимах показаны на рис. 5–7.

Ток в цепи предионизации в тестовом режиме



Рис. 5. Осциллограмма тока РВДД-коммутатора в тестовом режиме





Рис. 6. Осциллограмма тока запуска РВДД-коммутатора



Рис.7. Осциллограммы токов РВДД-коммутатора предионизации и силового РВД-коммутатора в основном режиме

Из приведенных осциллограмм видно, что в тестовом режиме через РВДД-коммутатор в прямом направлении протекает импульс тока амплитудой около 24 кА длительностью около 120 мкс. В основном режиме коммутатор предионизации коммутирует два импульса тока в прямом и обратном направлениях амплитудой 22–24 кА длительностью около 120 мкс. Ток запуска коммутатора составляет около 2 кА длительностью примерно 1 мкс, что является нормой для РВД такого типа.

Заключение

Опытный образец РВДД-коммутатора предионизации прошел испытания на стенде ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе макета модуля накопителя создаваемой лазерной установки. При рабочем напряжении 24 кВ в основном режиме работы модуля сделано 200 срабатываний. Через РВДД-коммутатор протекали два знакопеременных импульса тока амплитудой ~24 кА длительность около 120 мкс. Испытания прошли успешно, сбоев в работе нового РВДДкоммутатора не зарегистрировано. В дальнейшем планируются ресурсные испытания коммутатора в штатных условиях работы модулей накопителя.

Литература

1. Арзев А. Г., Галахов И. В., Осин В. А., Свиридов В. В. Влияние режима предионизации на электрофизические характеристики мощных импульсных ксеноновых ламп // Сборник докладов XI научно-технической конференции «Молодежь в науке» / Секция «Экспериментальная физика». 2012. С. 363–368.

2. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л. и др. Высоковольтные диодно-динисторные коммутаторы мощных знакопеременных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. 2014, № 4. С. 61–66.

3. Патент РФ 171465. Реверсивно-включаемый динистор с обратной проводимостью / А. А. Хапугин, В. А. Мартыненко, В. В. Елисеев, А. В. Гришанин, О. В. Фролов. 2016.

4. Ганин Л. С., Арзев А. Г., Беспалов Е. А. и др. Модуль емкостного накопителя с запасенной энергией 900 кДж на базе реверсивно включаемых динисторов для питания ламп накачки мощного неодимового лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». 2016. Т. 2. С. 55–62.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ПРОПУСКАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

<u>А. Ю. Архипов</u>, А. В. Богомолов, Е. И. Валекжанина, А. А. Городнов, М. И. Иванов, С. А. Картанов, К. Л. Михайлюков, А. Н. Субботин, М. В. Таценко

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

Введение

Высокоэнергетичная протонная радиография является одним из основных методов исследования в области быстропротекающих процессов и высоких плотностей энергии. Метод реализован на протонном радиографическом комплексе ПРГК-100, созданном на базе синхротрона У-70 [1]. Одним из направлений исследований, проводимых на комплексе, является измерение поверхностной и объемной плотностей объектов.

Канал формирования и регистрации протонных изображений комплекса ПРГК-100 состоит из магнитооптической системы, формирующей протонное изображение объектов, и трех пунктов регистрации протонных изображений (ПРПИ-1, 2 и 3), расположенных последовательно друг за другом. В каждом ПРПИ находятся по 16 оптических регистраторов.

Схема постановки радиографических экспериментов на ПРГК-100 представлена на рис. 1. Магнитные линзы 1 формируют пучок протонов с требуемым распределением протонов $N_0(x,y)$ в объектной плоскости квартета магнитных линз 4. Сцинтиллятор 2 конвертирует протонное изображение пучка в оптическое изображение, которое регистрируется цифровым регистратором 3. Магнитный квартет 4 работает по принципу «–1» оптики и переносит распределение протонов $N_0(x,y)$ из плоскости сцинтиллятора 2 в плоскость исследуемого объекта 6. Таким образом, регистрируя изображение пучка на сцинтилляторе 2, мы тем самым регистрируем распределение протонов падающих $N'_{np\Pi}$ на объект.

Протонографическое изображение, регистрируемые комплексом, являются теневыми, т. е. фор-

мируется за счет выбывания частиц из протонного пучка, проходящего через объект и магнитооптическую систему, вследствие ядерного и кулоновского взаимодействия протонов с ядрами вещества объекта. При этом неупругое ядерное взаимодействие приводит к однозначному выбыванию протонов из пучка, поскольку угол и энергия протонов после данного типа взаимодействия не позволяют магнитооптической системе захватить их в режим формирования изображения в фокальной плоскости 10. Протоны, участвующие в упругом ядерном и кулоновском взаимодействии, приобретают углы рассеяния и энергию, позволяющую им, в зависимости от величины акцептанса магнитооптической системы, участвовать в формировании изображения в фокальной плоскости магнитооптических квартетов 5 и 6. Важной особенностью радиографии с применением магнитной оптики является возможность изменять форму кривой пропускания, а, следовательно, и контраст изображения объекта, за счет коллимирования пучка протонов в центре магнитооптических квартетов 5 и 6. Для повышения контраста протонных изображений используются коллиматоры 8 и 17. При попадании на коллиматор, из пучка выбывают протоны, рассеянные в объекте на углы больше заданного. Величина угла отсечки протонов в коллиматоре оптимизируется по критерию максимальной чувствительности к перепаду плотности в данной области исследуемого объекта [2]. Магнитные линзы 5 и 6 формируют протонное изображение объекта в плоскостях сцинтилляторов10 и 14. Регистраторы 9 и 16 фиксируют оптическое изображение объекта $N_{\text{отсчОБ}}$.



Рис. 1. Схема эксперимента на комплексе ПРГК-100: 1 – магнитные линзы перед ПРПИ-1; 2 – сцинтиллятор; 3 – регистратор ПРПИ-1; 4 – магнитные линзы; 5, 6 – магнитные линзы перед системами регистрации ПРПИ-2 и 3; 7 – объект; 8 – коллиматор; 9 – регистратор ПРПИ-2; 10 – сцинтиллятор; 11 – зеркало; 12 – реперные объекты; 13 – зеркало; 14 – сцинтиллятор; 15 – зеркало; 16 – регистратор ПРПИ-3

Для корректной реализации измерений поверхностной и объемной плотностей исследуемых объектов необходимо знать зависимость коэффициента пропускания (кривую пропускания) магнитооптической системы, формирующей протонное изображение, от поверхностной плотности материала, из которого изготовлен исследуемый объект. Данную зависимость удобно измерять, используя в качестве объекта радиографирования многоступенчатые клинья.

Экспериментальное определение зависимости коэффициента пропускания магнитооптической системы от поверхностной плотности материалов

Для экспериментального измерения кривой пропускания проводится протонографирование объектов с известными значениями толщин. В качестве таких объектов использовались клинья с 6 и 9 градациями толщин из следующих материалов: капролон, дюралюминий, медь, сталь, свинец и сплав ВНЖ. Такой набор клиньев позволяет получить кривые пропускания для материалов с малой, средней и высокой плотностью. На рис. 2 представлены схематичные изображения 9-ти и 6-ти секционных клиньев.

Протонное изображение несет в себе информацию не только об исследуемом объекте, но и о распределении протонов в пучке, падающем на объект. На рис. За представлена исходная протонограмма и профиль сигнала, взятый вдоль линии, отмеченной на протонограмме. Очевидно, что форма профиля сигнала сильно зависит от распределения протонов в пучке.



Рис. 2. Схематичное изображение исследуемых клиньев: а – 9-ти секционного, б – 6-ти секционного



Рис. 3. Протонографические изображения клина: а – исходное, б – после коррекции и профили сигнала, взятые вдоль линий, отмеченных на протонограммах

Проведя деление (нормирование) матрицы сигналов изображения объекта на матрицу сигналов изображения падающего на объект пучка, с учетом разницы в чувствительности систем регистрации изображений, получаем величину пропускания магнитооптической системы. Величина сигнала в нормированной протонограмме каждой ступени клина является величиной пропускания магнитооптической системы для данного материала с данными массовыми толщинами. Скорректированная протонограмма и соответвующий профиль сигнала представлены на рис. 36.

Для построения искомой зависимости на нормированном изображении в каждой секции клина выбиралась область, внутри которой определялось среднее значение величины коэффициента пропускания, а также ее среднеквадратичное отклонение. Величина среднеквадратичного отклонения бралась в качестве погрешности измерения. Полученные экспериментальные значения аппроксимируются функцией вида:

$$y = A_0 * e^{-l_\lambda * x}.$$
 (1)

где параметр A — коэффициент пропускания без объекта, l_{λ} — коэффициент ослабления , x — поверхностная плотность.

На рис. 4 представлен сводный график экспериментальных значений коэффициента пропускания в зависимости от поверхностной плотности и аппроксимированные кривые пропускания для всех исследуемых материалов с коллиматором 150 мм. Такой диаметр коллиматора позволяет магнитной системе захватывать и доводить до плоскости регистрации более 95 % протонов, рассеявшихся в результате многократного кулоновского взаимодействия.



Рис. 4. Сводный график кривых пропускания, полученных по экспериментальным данным

На рис. 5 представлены кривые пропускания для алюминия и ВНЖ, полученные при разных коллиматорах.

Из графиков рис. 5 видно, что с уменьшением диаметра коллиматора увеличивается угол наклона кривой пропускания, что увеличивает контраст протонограмм и повышает чувствительность метода к изменению толщин, однако, одновременно снижается статистика протонов в изображении, что приводит к увеличению шума и снижению чувствительности. Таким образом, при выборе коллиматора необходимо оптимизировать его диаметр по максимальному значению величины сигнал/шум в изображении для заданного значения перепада толщин.



Рис. 5. Кривые пропускания, полученные при разных коллиматорах: а – для алюминия, б – для ВНЖ
Аналитический расчет кривой пропускания

Коэффициент пропускания магнитооптической системы определяется тремя физическими процессами, в которых при прохождении через объект участвуют протоны: неупругое ядерное рассеяние, кулоновское рассеяние и упругое рассеяние протонов на ядрах объекта, а также акцептансом магнитной системы. Часто, полагая, что угловая зависимость упругого рассеяния близка к угловому распределению кулоновского рассеяния и находится в его пределах, коэффициент пропускания описывается следующей аналитической функцией:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\frac{\rho l}{\lambda}} \left(1 - e^{-\frac{\theta_{\text{KOJII}}^2}{2\theta_{\text{MKP}}^2}} \right), \qquad (2)$$

где N₀ – число частиц в налетающем потоке, N – число частиц, прошедших через слой вещества толщиной *l*, λ – длина неупругого ядерного взаимодействия (г/см²), ρ – плотность вещества (г/см³), $\theta_{колл}$ – угол обрезки коллиматора, θ_{MKP} – среднеквадратичный угол многократного кулоновского рассеяния, который определяется по формуле (3):

$$\theta_{MKP} = \frac{13,6}{E} \sqrt{\frac{\rho l}{X_0}},\tag{3}$$

где *E* – энергия протонов, *X*₀ – радиационная длина вещества объекта.

Расчет кривых пропускания с использованием формул (2) и (3) проведен для следующих материалов: алюминий, медь, железо, свинец и вольфрам. На рис. 6 представлен сводный график, полученный с коллиматором 150 мм.



Рис. 6. Сводный график кривых пропускания, полученных аналитически

Для алюминия и вольфрама проведен расчет коэффициентов пропускания с коллиматорами 150, 110, 80 и 50 мм. Результаты расчетов приведены на рис. 7.



Поверхностная плотность, г/см

Рис. 7. Кривые пропускания, рассчитанные с разными коллиматорами: а – для алюминия, б – для ВНЖ

б

25 50 75 100 125 150 175 200 225 250 275 300

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых пропускания

На рис. 8 а-8г представлено сравнение кривых пропускания для алюминия, железа, меди, свинца и ВНЖ при коллиматоре диаметром 150 мм. Хорошее согласие аналитических кривых и экспериментальных данных получены для алюминия и меди (рис. 8а и 8в).



б-железа, в - меди, г - свинца, д - ВНЖ

Разницу в кривых пропускания можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, на профиль нормированной протонограммы объекта большое влияние оказывает размытие в сцинтилляторе, обусловленное вторичными частицами, возникающими при взаимодействии протонов с веществом сцинтиллятора, а также перерассеянием света внутри сцинтиллятора. Этот фактор учитывается путем деконволюции протонного изображения с функцией размытия точки (ФРТ), которая определяется экспериментально. При измерении кривых пропускания, описанных выше, протонные изображения регистрировались с применением сцинтиллятора толщиной 5 мм, а для компенсации использовалась ФРТ, экспериментально измеренная для сцинтиллятора толщиной 2 мм [3] Экспериментальных данных по сцинтиллятору толщиной 5 мм на настоящий момент нет. Вероятно, применение при обработке известной ФРТ, полностью не компенсирует завышенный уровень сигнала в области больших толщин и заниженный в области малых толщин. На рис. 9 представлено сравнение аналитических кривых и экспериментальных данных для ВНЖ при разных коллиматорах. Видно, что в районе толщин свыше 150 г/см² отклонение экспериментальных данных от аналитики для коллиматора диаметра 150 мм доходит до 15 %, для коллиматора 80 мм — до 30 %, что является очень существенной величиной.



Рис. 9. Сводный график кривых пропускания для ВНЖ с разными коллиматорами: точки – экспериментальные данные, линии – расчетные кривые

Вторым фактором, вызывающим расхождение экспериментальных и аналитических кривых, является отсутствие учета в аналитической формуле (2) упругого ядерного взаимодействия протонов, которое приводит к увеличению общего угла рассеяния протонов и уменьшению коэффициент пропускания.

Для проверки влияния упругого рассеяния на результаты протонографирования было проведено сравнение экспериментальных кривых пропускания для железа и алюминия с кривыми, полученными путем моделирования методом Монте-Карло с помощью программы Geant4, учитывающего все взаимодействия протонов с веществом, кроме того при моделировании произведен учет магнитной системы протонографического комплекса. Также проведено сравнение с аналитическими расчетами, учитывающими упругое ядерное взаимодействие. Такие расчеты базируются на аппроксимации угла упругого ядерного рассеяния с помощью двух гауссианов с последующей их сверткой с гауссианом, описывающим угол многократного кулоновского рассеяния. Сводный график кривых пропускания с коллиматором 50 мм, полученных разными способами, приведен на рис. 10.



Рис. 10. Сводный график кривых пропускания, полученных разными способами: а – для алюминия, б – для железа

Видно, что наиболее точно экспериментальные данные описываются кривой, учитывающей упругое ядерное рассеяние.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты измерений зависимости коэффициента пропускания магнитооптической системы от поверхностной плотности для ряда материалов (капролон, дюралюминий, медь, сталь, свинец и сплав ВНЖ), а также проведено сравнение полученных результатов с расчетами. Хорошее согласие экспериментальных и расчетных кривых получено при коллиматоре максимального диаметра 150 мм для материалов малых и средних плотностей.

Экспериментальные кривые для материалов высокой плотности имеют более существенные отличия от аналитических расчетов, что, вероятнее всего, связано с большим влиянием формы ФРТ на результат эксперимента. При учете упругого ядерного взаимодействия различия между экспериментальными данными и аналитическими уменьшаются. Исследования в данном направлении будут продолжаться.

Литература

1. Андриянов А. И. и др. Ввод в эксплуатацию протонорадиографического комплекса на ускорителе У-70 // Приборы и техника эксперимента. 2016, № 3. С. 61–68.

2. Трутнев Ю. А., Картанов С. А., Таценко М. В. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. 2010, № 3. С. 5–12.

3. Пат. № 2529454 РФ, 27.09.2014, МПК G03B42/08. Способ определения экспериментальным путем функции размытия точки (ФРТ) в конвертере для регистрации протонного излучения / Михайлюков К. С., Картанов С. А., Таценко М. В.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО МЕТАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

А.С.Балабанов, Д.С.Кудрявцев, Д.В.Маляров, В.С.Роженцов

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

Околоземное космическое пространство является самым используемым участком космоса на данном этапе развития человечества. Ежегодно на различные орбиты выводится большое количество спутников, обеспечивающих нашу повседневную жизнь. Однако их стабильной работе угрожают объекты естественного (микрометеориты) и искусственного происхождения – так называемый «космический мусор» (КМ). КМ – это фрагменты космических аппаратов (КА), частицы твердого ракетного топлива и т. д. Их размеры могут варьироваться от долей миллиметра, до десятков сантиметров [1]. На орбите частицы КМ могут представлять опасность для КА, так как скорость их сближения с КА может составлять до нескольких километров в секунду.

Жизненно важные узлы КА оснащаются противометеоритной защитой [2], однако такие структурные элементы как солнечные панели и двигатели (маневровые и двигатели коррекции) такой защиты не имеют. Встреча с КМ может привести к существенному затруднению работы КА, вплоть до вывода его из строя.

Для экспериментальной проверки эффективности противометеоритной защиты, а также оценки возможных последствий воздействия частиц КМ на незащищенные узлы, необходимо разработать устройство, которое могло бы воспроизводить в наземных условиях такое воздействие (удар компактным элементом (КЭ) массой более 0,1 г со скорость более 3 км/с). В качестве устройства для создания КЭ, обладающего указанными характеристиками предложено выбрать взрывное метающее устройство (ВМУ).

Известно [3], что наиболее простым способом взрывного разгона ударников является прямое метание с помощью подрыва слоя заряда взрывчатого вещества. Предельной скоростью метания в такой постановке является скорость детонации использованного взрывчатого состава заряда ВВ (скорость разлета продуктов взрыва в вакууме) [3], ограниченная значением (7,0÷9,0) км/с. Таким образом, для дальнейших проработок был принят способ прямого метания ударников. Оценка скорости метания ударников таким способом может быть проведена по одномерной модели, предложенной Гарни (рис. 1) [4]. Согласно этой модели для получения высоких скоростей метания необходимо увеличивать отношение длины заряда к толщине ударника, т. е. более эффективно разгоняются относительно тонкие ударники (пластины, лайнеры). Для получения высокоскоростного КЭ (отношение размеров близко к единице) необходимо «скомпактировать» метаемую взрывом пластину для чего нужно придать ее периферийным частям радиальную (направленную к оси) составляющую скорости. Это можно сделать, используя ударники в форме сегмента сферической оболочки.



Рис. 1. Одномерная модель Гарни

В контакте с ВВ находится несжимаемое тело с плотностью ρ_1 , толщиной δ_1 .

Для оценки скорости метания метаемого тела (пластины) использовались следующие формулы:

- в предположении мгновенной детонации ВВ

$$V_1 = \frac{r}{r+2} D_{\sqrt{\frac{k}{k^2 - 1}}},$$
 (1)

- для метания падающей детонационной волной

$$V_2 = D \frac{\sqrt{1 + (32/27)r} - 1}{\sqrt{1 + (32/27)r} + 1},$$
 (2)

где $r = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_1 \delta_1}.$

Результаты оценок скорости метания V_1 и V_2 тела плотностью $\rho_1 = 2700$ кг/м³ и толщиной $\delta_1 = 2,0$ мм представлены на рис.2. На рис.3 приведены требуемые массы $m_{\rm BB}$ заряда BB для метания тела диаметром 10,0 мм.



Рис. 2. Зависимость скорости метания тела от толщины слоя BB



Рис. 3. Зависимость массы заряда от толщины слоя ВВ

Анализ зависимости на рис. 3 говорит о том, что требуемая скорость метаемого тела (более 3,0 км/с) реализуется при толщине слоя более 3 мм. Масса заряда при таких толщинах изменяется от 5,0 до 25,0 г (дальнейшее увеличение массы очень незначительно увеличивает скорость), что считается приемлемым для экспериментальной отработки.

В результате ряда итерационных расчетов была обоснована конструкция ВМУ, схематично представленная на рис. 4. Заряд ВВ диаметром 18,0 мм помещен в стальной толстостенный корпус для снижения влияния на процесс разгона ударника боковых волн разгрузки. В ствольной части корпуса установлен ударник из алюминиевого сплава в форме сферического сегмента диаметром 10,0 мм толщиной 2,0 мм, прогибом 1,5 мм. Инициирование производилось в центре левого (рис. 4) торца заряда. Данная схема ВМУ аналогична схеме высокоскоростного метания из [4] (стр. 37).



Рис. 4. Схема ВМУ

Результаты расчета схемы ВМУ представлены полем плотности, рис. 5 а, и распределением скорости по оси КЭ, рис. 5 б, на момент t = 15 мкс от подрыва заряда.

Согласно расчету, устройство формирует компактный элемент размерами $6,0 \times 5,8$ мм, массой около 0,35 г, движущийся со скоростью около 3,7 км/с. В элементе равномерное распределение плотности, что позволяет надеяться на формирование сохранного (не разрушенного) КЭ, а присутствующий сжимающий градиент скорости является недостаточным для его дальнейшего разрушения в процессе полета.

В экспериментах скорость КЭ (или его лидирующего осколка) определялась хронографическим способом по временам срабатывания лавсановых контактных датчиков, установленных на траектории его полета. Форма КЭ и его сохранность контролировалась с помощью рентгеновского поста. По рентгенограмме также оценивалась и масса КЭ. После прохождения измерительных участков элемент попадал в металлическую мишень, образуя кратер, по форме которого оценивалась сохранность КЭ.





Рис. 5. Поле плотности и распределение скорости по оси КЭ на момент t = 15 мкс: а – поле плотности, б – распределение скорости

В эксперименте № 1 получено значение скорости 5,0 км/с. Это существенно выше расчетной величины. Однако, как видно на рентгеновском снимке (рис. 6), впереди наиболее массивного элемента (масса около 0,3 г) летит ряд его фрагментов. Следовательно, полученное значение скорости является скоростью его лидирующего фрагмента. К тому же из рентгенограммы видно, что датчик замкнулся раньше, чем до него долетел наиболее массивный элемент. На мишени образовался кратер «вытянутой» формы диаметром около 5,0 мм, глубиной 8,5 мм, что является следствием последовательного воздействия фрагментов элемента.

Появление ряда фрагментов перед наиболее массивным элементом вызвано большой величиной прогиба ударника, которая приводит к интенсивному схождению его материала к оси симметрии и формированию кумулятивной струи, части которой и образуют фрагменты, видимые на рентгенограмме.

Конструкция ВМУ была доработана – прогиб ударника уменьшен до 1,0 мм, однако, при снижении количества и массы фрагментов, движущихся перед основным (наиболее массивным) элементом, полностью избавиться от них не удалось (см. рис. 7).



Рис.7. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 2

При дальнейшем уменьшении прогиба ударника до 0,8 мм удалось избавиться от лидирующих фрагментов. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 3, приведен на рис. 8. Видно, что ударник скомпоновался в «диск» диаметром около 7,5 мм. Его скорость составила около 4,0 км/с, что близко к расчетной. На мишени был получен кратер диаметром 14 мм и глубиной 5,2 мм.



Рис. 8. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 3

Для улучшения компактирования предложено увеличить прогиб до 0,9 мм. Конструкция с таким ударником проверена в эксперименте № 4.

По изображению КЭ на рентгеновском снимке (рис. 9) и форме кратера можно сказать, что компактирование ударника считается приемлемым. Скорость КЭ составила около 4,0 км/с, что близко к полученной расчетно и в эксперименте № 3. Масса элемента составила 0,35 г.

Для подтверждения полученных результатов были проведены два эксперимента, в которых все параметры конструкции ВМУ оставались неизменными.

Рентгеновские снимки, полученные в эксперименте № 5 и № 6, приведены на рис. 10. Видно, что из ударников сформировались элементы, практически идентичные по форме и размерам КЭ, полученному в расчете. В эксперименте №5 скорость КЭ составила 3,83 км/с, а его масса элемента составила 0,34 г.



Рис. 9. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 4



Рис.10. Рентгеновские снимки: а – эксперимент № 5; б – эксперимент № 6

В эксперименте № 6 для защиты мишени от ствольной части корпуса ВМУ в бронекамеру устанавливался отсекатель из алюминия с отверстием диаметром 15,0 мм, в которое свободно пролетает КЭ, но не проходит ствольная часть корпуса. Ударник скомпоновался в КЭ, размеры которого составили 6,5×5,5 мм, а его масса 0,32 г. Скорость КЭ составила 4,15 км/с.

Таким образом, расчетно обоснована и экспериментально отработана конструкция ВМУ, формирующая КЭ из алюминиевого сплава со следующими характеристиками: -масса 0,34 г;

- скорость КЭ 4,0 км/с.
- размеры 6,5×5,5 мм.

С помощью такого ВМУ можно испытывать элементы конструкций и систем противометеоритной защиты КА на воздействие частиц космического мусора.

Литература

1. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред.

Р. Р. Назирова., О. Ю. Аксенова. – М.: ИКИ РАН, 2013.

2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учебн. пособие. – М.: Университетская книга, 2009.

3. Физика взрыва. 3-е изд., переработанное. Т. 1. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.

4. Физика взрыва. 3-е изд., переработанное. Т. 2. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОЛУШИРИНЫ НОМИНАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ДЕЛЕНИЙ РЕАКТОРА БР-К1М С ПОМОЩЬЮ ГРАФИТОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

<u>К. А. Белошицкий</u>, В. Х. Хоружий, А. Б. Соколов, Д. В. Грачев

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

Конструкция активной зоны реактора БР-К1

Бустер-реактор «Каскад» (БР-К1) – апериодический импульсный реактор (АИР) самогасящегося действия (рис. 1) был разработан и введен в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995 году. Это односекционный АИР, отличающийся горизонтальной ориентацией центральной оси активной зоны (АЗ) и большими размерами как самой АЗ, так и центральной облучательной полости. АЗ выполнена в виде горизонтального полого цилиндра диаметром 617 мм и длиной 748 мм. Материалом АЗ является сплав урана 36 %-ного обогащения с молибденом (массовое содержание молибдена 9 %). Масса сплава в АЗ равна 1511 кг. Топливный материал АЗ разбит на коаксиальные кольца. Топливные элементы (ТЭ) заключены в герметичные, заполненные гелием чехлы (блоки) из нержавеющей стали.



Рис. 1. Внешний вид реактора БР-К1

Основой структуры АЗ являются пять автономных блоков, каждый блок представляет собой глубоко подкритичную сборку. Большая часть топливного материала приходится на три неподвижных блока НБ-1Л (левый), НБ-1П (правый) и НБ-2. Аварийный блок (АБ) является основным элементом аварийной защиты, обес печивающим быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Подвижный блок (ПБ) компенсирует реактивность, вносимую сильно-возмущающими загрузками. Регулирующие блоки (РБ) РБ-1 и РБ-2 выполнены в виде двух полуцилиндров из бронзы, охватывают подвижный блок. Импульсный блок (ИБ) и стоп-блок (СБ) размещены у торцевой стороны блока НБ-1П, изготовлены из бериллия и заключены в титановые чехлы [1]. Основные проектные характеристики БР-К1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики реактора БР-К1

	Проектные параметры	Разрешенные (действующие) параметры		
Импульсный режим				
Энерговыделение в АЗ, делений (МДж)	до 4·10 ¹⁸	до 1,0·10 ¹⁸ (~ 30)		
Флюенс нейтронов в опор- ной точке КГЗ, см ⁻²	$2 \cdot 10^{15}$	$5,1 \cdot 10^{14}$		
Ширина импульса на по- ловине высоты, мкс	200	1200		
Средняя энергия нейтро- нов, МэВ	0,78			
Статический режим				
Мощность, кВт (дел/с)	$30(1 \cdot 10^{15})$	до 10 (3,3 10 ¹⁴)		

Недостатки существующей конструкции АЗ БР-К1. Предлагаемые меры по модернизации установки

При выполнении физического пуска БР-К1 разработчики столкнулись с деформациями чехлов из нержавеющей стали, создающими препятствия нормальной работе реактора при высоких уровнях стационарной мощности или энерговыделения за импульс [2]. На схеме структурных блоков реактора БР-К1, см. рис. 2, показаны места блокировки движения АБ, ИБ и СБ.



Рис. 2. Схема структурных блоков реактора БР-К1 (вид сверху): — – места блокировки движения АБ, ИБ и СБ

В соответствии с экспериментальными данными, полученными при физическом пуске, и расчетным анализом предусмотренные проектом технические характеристики реактора были ограничены (см. табл. 1).

С развитием процедуры численного моделирования теплофизических процессов открылась возможность оптимизации конструкции чехлов реактора БР-К1 для исключения коробления последних, повышения безопасности функционирования установки во всех режимах и вывода реактора на параметры, близкие к проектным.

В настоящий момент модернизация реактора выполняется по следующим направлениям:

 исключение разнотолщинности стенок чехлов (уменьшение толщины массивных цилиндрических обечаек);

 исключение использования при изготовлении чехлов кованых заготовок, имеющих после поковки неоднородности структуры материала и внутренние напряжения;

 применение при изготовлении чехлов материалов, имеющих меньший коэффициент линейного расширения и лучшие прочностные свойства; изготовление и установка дополнительных сегментов отражателей нейтронов в целях искусственного уширения импульса для уменьшения напряжений в топливных элементах АЗ;

 изготовление и установка быстрого импульсного блока (БИБ) для достижения необходимой скорости ввода реактивности в процессе генерации импульса в безопасном режиме с «мощности».

Для реализации приведенных выше направлений модернизации были проведены расчеты, приведенные в [1], которые определили величину «безопасной» полуширины импульса – 600 мкс, при которой напряжение, возникающее в ТЭ двух наиболее нагруженных блоках реактора АБ и НБ-1П при различных температурах нагрева в процессе генерирования импульса, не превышают предела текучести материала.

Форма импульса делений на мгновенных нейтронах с отражателем x = 300 мм, y = 185 мм при начальной мощности $1 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и движении БИБ со скоростью 9 м/с приведена на рис. 3 [3].



Рис. 3. Расчетная форма импульса делений на мгновенных нейтронах с отражателем x = 300 мм, y = 185 мм при начальной мощности $1 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и движении БИБ со скоростью 9 м/с

Регулирование полуширины номинального импульса делений реактора БР-К1М с помощью графитового отражателя

При проектировании модернизированного реактора БР-К1 (БР-К1М) на основании расчетов, результаты которых приведены в [1], была разработана конструкция графитового отражателя (см. рис. 4).

Расчетная модель, как правило, описывает реальные физические характеристики изучаемого процесса с некоторой погрешностью. В целях компенсации этой неопределенности была предложена новая конструкции верхнего сегмента графитового отражателя, предусматривающая возможность варьирования его толщины, а также зазора между верхним сегментом графитового отражателя и поверхностью АЗ.

Для регулирования полуширины импульса делений с целью достижения ее «безопасной» величины предполагается два способа:

1) изменение толщины верхнего графитового отражателя;

2) изменение расстояния от нижней поверхности верхнего графитового отражателя до центра АЗ.

Для оценки эффективности этих способов были проведены расчетные исследования влияния толщины верхнего сегмента графитового отражателя и зазора между ним и поверхностью АЗ на величину полуширины импульса делений на мгновенных нейтронах.

Следует отметить, что приведенные выше характеристики импульсов делений получены исходя из расчетной зависимости вводимой реактивности от положения БИБ при постоянной скорости его движения.

В данных исследованиях были учтены следующие особенности: использование экспериментальных данных по вводу реактивности в зависимости от положения БИБ [3] и реализуемым неравномерным скоростям его движения, полученных после отработки макета пневматического исполнительного механизма БИБ;

– использование более точных нейтронных констант для титана из библиотеки ENDF/B-7.1;

 новая конструкция верхнего сегмента графитового отражателя.

Конструкция графитового отражателя

Конструкция отражателя приведена на рис. 4.

Графитовые блоки прямоугольной формы размещены на силовом каркасе. Каркас закреплен на защитной плите реактора. Длина отражателя вдоль оси активной зоны реактора составляет 1,0 м, толщина от 185 (верхний сегмент) до 300 мм (боковые сегменты). Суммарная масса графита верхнего сегмента составляет 384 кг. Суммарная масса графита каждого бокового сегмента составляет 576 кг. Среднее значение перегрева поверхностей ТЭ, обращенных к отражателю, составляет ~13 %.

В расчетной модели рассматривались три варианта размещения верхней части графитового отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра A3: 45,1, 50,1 и 55,1 см и три варианта представления графитового отражателя с высотой его верхней части 20,5, 21,5 и 22,5 см.

Схема конструктивных особенностей графитового отражателя, с толщиной верхней части графитового отражателя 21 см, который размещен на высоте 50,1 см от центра АЗ, приведена на рис. 5.



Рис. 4. Конструкция сегментов отражателя



Рис. 5. Конструктивные особенности нового графитового отражателя

Ввод реактивности с использованием пневматического исполнительного механизма БИБ

Учет функциональной связи реактивности, обусловленной перемещением БИБ, с его позиционной координатой на пролетной базе осуществлялся с использованием зависимостей ввода реактивности БИБ от позиционной координаты и характера перемещения БИБ макетом пневматического исполнительного механизма БИБ. В иллюстративной графической форме указанные функциональные зависимости представлены на рис. 6 [3].



Рис. 6. Функциональные зависимости: - - - – зависимость реактивности, вносимой БИБ, от пролетной координаты; — – зависимости пролетной координаты от времени пролета и рабочего давления пневмопривода

Расчетный формализм

Влияние отражателя на АЗ рассчитывалось с помощью метода Монте-Карло [4]. Расчеты позволили получить функцию Грина мгновенных нейтронов, т. е. скорость вторичных делений $B_p(\tau)$, вызванную

мгновенными нейтронами первичного деления, произошедшего в момент времени $\tau = 0$ [5]. Функция необходима для расчета импульсов делений, так как при наличии замедленных нейтронов описание быстрой размножающей системы с помощью среднего времени генерации является неадекватным.

Расчет учитывал облицовку боковых графитовых отражателей и верхнего графитового отражателя сталью марки 3 толщиной 6 мм и стальную опорную плиту толщиной 90 мм (материал – сталь марки 3), на которой размещена АЗ реактора и которая также предназначена для уменьшения дозовой нагрузки гамма-излучения на персонал при проведении технического обслуживания реакторного стенда.

Расчеты импульсов делений проводились с помощью методов Гира [6] с использованием эффективного времени генерации, обусловленного лишь короткоживущей компонентой функции. Долгоживущие компоненты функции учитывались аналогично запаздывающим нейтронам.

В качестве основной процедуры генерирования импульсов делений на мгновенных нейтронах принималась процедура, осуществляемая путем вывода БИБ из полости неподвижных блоков АЗ НБ-1Л, НБ-1П с избранной начальной мощности реактора величиной 1.0·10¹⁰ дел. АЗ/с и со скоростями, реализуемыми на макете пневматического исполнительного механизма БИБ при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12,15 кг/см².

Результаты расчетов получены при условии равенства коэффициентов гашения реактивности ($\gamma = 1,96 \cdot 10^{-19} \beta_{3\phi/дел}$) в реакторах БР-К1 и БР-К1М и при использовании значения эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{3\phi} = 0,00719$, которая была рассчитана с использованием нейтронных констант библиотеки JENDL-4.

Результаты расчетов

Расчетные параметры импульсов делений (мощность в пике импульса $P_{пик}$, полуширина импульса $\Theta_{1/2}$, полное энерговыделение Y), полученные для реактора БР-К1М с графитовым отражателем для местоположений по высоте верхнего отражателя относительно центра A3 L = 45,1 см, L = 50,1 см иL = 55,1 см представлены в табл. 2. Толщина верхнего графитового отражателя составляла H = 21 см.

Расчетные параметры импульсов делений, полученные для реактора БР-К1М с графитовым отражателем с толщиной верхнего отражателя (H) 23, 24, 25 см представлены в табл. 3.

На рис. 7 и 8 приведены функции и их графики, полученные по результатам линейной аппроксимации данных табл. 2 и 3 с помощью стандартных функций Excel. Аппроксимирующие функции вида $\theta_{1/2}$ (*L*) выражают зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений от высоты расположения верхнего отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра АЗ при вводе реактивности, реализуемой при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см². Аппроксимирующие функции вида $\theta_{1/2}(H)$ выражают зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений от толщины графита в верхнем отражателе при вводе реактивности реализуемой при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см².

Таблица 2

Пореметр	Расстояние от оси АЗ до верхнего отражателя L, см (H = 21 см)					
параметр	45,1	50,1	55,1			
Избыточное давление $P = 9 \text{ кг/см}^2$						
Мощность в пике импульса <i>Р</i> _{пик} , дел.АЗ/с	$2,49 \cdot 10^{21}$	$2,80 \cdot 10^{21}$	$3,15 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса $ heta_{1/2}$, мкс	750	640	557			
Полное энерговыделение У, дел. АЗ	$3,00 \cdot 10^{18}$	3,00·10 ¹⁸	$3,00 \cdot 10^{18}$			
Избыточное давление $P = 12 \ \mathrm{кr/cm^2}$						
Мощность в пике импульса <i>Р</i> _{пик} , дел.А3/с	$2,54 \cdot 10^{21}$	$2,96 \cdot 10^{21}$	$3,43 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса $ heta_{1/2}$, мкс	727	607	523			
Полное энерговыделение Ү, дел.АЗ	$2,96 \cdot 10^{18}$	3,00·10 ¹⁸	$3,03 \cdot 10^{18}$			
Избыточное давление $P = 15 \text{ кг/см}^2$						
Мощность в пике импульса Р _{пик} , дел.АЗ/с	$2,48 \cdot 10^{21}$	$2,96 \cdot 10^{21}$	$3,52 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса $ heta_{1/2}$, мкс	736	603	512			
Полное энерговыделение У, дел. АЗ	$2,89 \cdot 10^{18}$	$2,95 \cdot 10^{18}$	3,01.1018			

Расчетные параметры импульсов делений реактора БР-К1М с номинальным энерговыделением *Y* = 3·10¹⁸ делений при различных размещениях по высоте верхнего отражателя относительно центра АЗ

Таблица 3

Расчетные параметры импульсов делений БР-К1М с номинальным энерговыделением Y = 3 · 10¹⁸ делений при различной высоте высота верхнего отражателя

Попоматр	Высота верхнего отражателя <i>H</i> , см					
параметр	20.5	21.5	22.5			
Избыточное давление $P = 9 \text{ кг/см}^2$						
Мощность в пике импульса P _{пик} , дел.АЗ/с	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,80 \cdot 10^{21}$	$2,64 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса θ _{1/2} , мкс	596	636	684			
Полное энерговыделение У, дел.АЗ	$3,00.10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$			
Избыточное давление $P = 12 \text{ кг/см}^2$						
Мощность в пике импульса <i>Р</i> _{пик} , дел. АЗ/с	$3,18 \cdot 10^{21}$	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,75 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса θ _{1/2} , мкс	563	604	654			
Полное энерговыделение У, дел.АЗ	$3,01 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$2,98 \cdot 10^{18}$			
Избыточное давление $P = 15 \text{ кг/см}^2$						
Мощность в пике импульса <i>Р</i> _{пик} , дел.АЗ/с	$3,18 \cdot 10^{21}$	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,73 \cdot 10^{21}$			
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	554	599	653			
Полное энерговыделение Ү, дел.АЗ	3,01.1018	$2,96 \cdot 10^{18}$	$2,92 \cdot 10^{18}$			



Рис. 7. Зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах от высоты расположения верхнего отражателя с толщиной графита 21 см



Рис. 8. Зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах от толщины графита в верхнем отражателе относительно центра АЗ

Для определения приращения полуширины импульса делений от изменения высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ с толщиной графита 21 см или изменения толщины графита была использована формула для производной в средней точке, имеющая второй порядок точности[7]:

$$\frac{\partial \theta_{1/2}}{\partial x} = \frac{\theta_{1/2}(x + \Delta h) - \theta_{1/2}(x - \Delta h)}{2\Delta h}, \qquad (1)$$

где x — величина в средней точке расстояния по высоте относительно центра АЗ верхнего отражателя (табл. 1) x = L = 50,1 см или величина в средней точке толщины графита (табл. 2) x = H = 21,5 см; Δh – величина разности расстояний по высоте относительно центра АЗ верхнего отражателя для двух соседних расчетных точек, согласно данным табл. 2 $\Delta h = \Delta L = 5$ см или величина разности толщин графита верхнего отражателя для двух соседних верхнего отражателя для двух соста верхнего отражателя для двух соседних расчетных точек, согласно данным табл. 3 $\Delta h = \Delta H = 1$ см.

Таким образом, на основании данных, приведенных в табл. 2 и 3, для возможного регулирования полуширины номинальных импульсов делений в процессе физического пуска реактора возможно использовать следующие значения производных, полученных усреднением значений производных, определенных по соотношению (1), соответствующих вводу реактивности при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см²:

 – для подбора полуширины импульса делений за счет изменения высоты верхнего отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра А3

$$\frac{\partial \theta_{1/2}}{\partial L} = -20, 7 \frac{MKC}{CM}; \qquad (2);$$

 – для подбора полуширины импульса за счет изменения толщины графита верхнего отражателя

$$\frac{\partial \Theta_{1/2}}{\partial H} = 46, 3 \frac{\text{MKC}}{\text{CM}}.$$
(3)

Заключение

Расчетный анализ влияния параметров графитового отражателя, а именно его местоположения по высоте относительно центра АЗ при толщине графита 21 см или толщины графита, на параметры импульса делений на мгновенных нейтронах модернизируемого реактора БР-К1, показал, что регулирование полуширины импульса делений с энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений для достижения «безопасной» величины $\theta_{1/2} = 600$ мкс можно выполнить двумя способами.

Первый способ регулирования величины полуширины импульса делений — изменение местоположения по высоте относительно центра АЗ верхнего графитового отражателя с толщиной графита 21 см. Для подбора высоты верхнего графитового отражателя целесообразно использовать соотношение (2).

Второй способ регулирования величины полуширины импульса делений – изменение толщины графита верхнего отражателя при фиксированном расстоянии до центра АЗ 501 мм. Для подбора толщины графита верхнего отражателя целесообразно использовать соотношение (3).

Новая конструкция верхнего графитового отражателя и его крепления, разработанная, в том числе, на основании приведенного выше расчетного исследования, обеспечивает: жесткое крепление к силовому каркасу стенда реактора;

 возможность регулирования высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ в диапазоне от 45 см до 56 см;

– возможность конструктивной вариативности толщины графита верхнего графитового отражателя в пределах от 19 до 27 см при сохранении расстояния между центральной осевой АЗ и нижней плоскостью отражателя величиной 501 мм.

Подводя итоги на основании вышеизложенного, следует отметить, что первый способ реализации требуемой величины полуширины импульса делений на мгновенных нейтронах за счет изменения высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ при фиксированной толщине графита 21 см является более перспективным вследствие экономии времени и ресурсов при проведении работ по физическому пуску установки БР-К1М.

Литература

1. Девяткин А. А., Воронцов С. В., Колесов В. Ф. и др. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 4. С. 43–53. 2. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.

3. Кошелев А. С., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Быстрый импульсный блок для модернизируемого реактора БР-К1 // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. Т. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2016. С. 65–70.

4. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

5. Хоружий В. Х. Уравнения кинетики реактора и бустера в терминах интенсивности делений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2010. Вып. 2. С. 14–16.

6. Хоружий В. Х., Кошелев А. С., Колесов В. Ф. Интегрирование уравнений кинетики импульсного реактора на быстрых нейтронах жестко-устойчивыми методами Гира // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 1. С. 8–14.

7. Калиткин Н. Н. Численные методы. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург. 2011.

ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ «МИКРОЗОНД» ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 4 МЭВ ПРИ ПОМОЩИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАПИЛЛЯРА

<u>К. С. Величко</u>, И. А. Карпов, Д. А. Федотов

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

На комплексе «Микрозонд» ведутся работы по получению пучков ускоренных протонов микронного и субмикронного размера при помощи диэлектрических капилляров. Использование диэлектрических капилляров для фокусировки пучков заряженных частиц (протоны, ядра гелия, тяжелые ионы) позволит расширить возможности установки «Микрозонд» по пространственному разрешению при проведении элементного и структурного анализа материалов.

При использовании диэлектрических капилляров часто наблюдается эффект самоорганизации системы пучок-капилляр, при котором ионы заряжают стенки капилляра, вследствие чего следующие частицы движутся в капилляре без соударения со стенками. Такой эффект был назван guiding-эффект [1-2]. В конических капиллярах guiding-эффект приводит к эффекту фокусировки пучка на выходе капилляра. При этом часть ионов пучка поддерживают заряд на стенках капилляра, а оставшаяся часть ионов пучка фокусируется на выходе конической части капилляра. Для guiding-эффекта важно, в какой области капилляра образуется объемный заряд, так как при определенных условиях вместо самоорганизации системы пучок-капилляр заряд будет препятствовать прохождению и фокусировке ионов. Место образования объемного заряда зависит от геометрии входного пучка ионов, формы капилляра и возможности самоорганизации равновесного состояния заряда и разряда этой области. Геометрия входного пучка ионов зависит от режима работы фокусирующей системы установки «Микрозонд», а именно - расположения фокуса ионного пучка.

Для определения оптимальной геометрии входного пучка протонов с энергией 4 МэВ при их фокусировке диэлектрическим капилляром были определены несколько точек фокусировки: в цилиндрической области капилляра, в области конусообразного сужения, на расстоянии 1 и 3 мм от конца капилляра.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Держатель 3 с диэлектрическим капилляром 2 Femtotips (выходной диаметр 0,5 мкм, входной диаметр 1,5 мм) устанавливался на торец системы сканирования 5 в специальный корпус. Перед капилляром была установлена диафрагма 4 диаметром 1 мм для коллимации входящего в капилляр пучка протонов и регистрации входного тока. Точки Ф1, Ф2, Ф3 и Ф4 соответствуют расстояниям 66, 73, 83 и 86 мм от торца системы сканирования установки «Микрозонд». Цилиндрическая часть капилляра 2 была заземлена на корпус держателя для стекания излишнего заряда.

Без капилляра пучок протонов с энергией 4 МэВ фокусировался с помощью линз установки «Микрозонд» в точках $\Phi 1 - \Phi 4$ с фиксацией значений токов линз. После установки капилляра значения токов линз для каждой из точек $\Phi 1 - \Phi 4$ были последовательно восстановлены и проведены измерения токов на цилиндре Фарадея 1.



Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ЦФ (цилиндр Фарадея), 2 – капилляр Femtotips II, 3 – держатель, 4 – диафрагма, 5 – система сканирования установки «Микрозонд», 6 – линзы системы фокусировки установки «Микрозонд», 7 – пикоамперметр Keithley 6485

При фокусировке протонов в точках $\Phi 1 - \Phi 3$ ток протонов после капилляра зафиксирован не был. Это можно объяснить тем, что на стенках капилляра образовывается объемный самоподдерживающий заряд, который препятствует появлению guiding-эффекта.

В случае фокусировки протонов в точку Ф4 был зафиксирован ток протонов (рис. 2). На диафрагме ток протонов составил 12 нА, а максимальное значение тока после капилляра – 0,13 нА, что соответствует 1 % от входной величины. На диаграмме виден «пилообразный» характер тока, который можно объяснить процессом заряда и разряда области капилляра, отвечающей за фокусировку и пропускание протонов. Такой характер выходного тока ионов наблюдался и в работе [3], где также исследовались особенности прохождения и фокусировки ионов диэлектрическими капиллярами с субмикронным выходным отверстием. Провал на диаграмме обусловлен механическим прерыванием пучка оператором установки.



Рис. 2. Диаграмма тока в при фокусировке протонов в точке Ф4

Затем фокусирующие линзы установки «Микрозонд» были переведены в режим, при котором на входе в капилляр формировался квазипараллельный пучок. Полученная диаграмма тока представлена на рис. 3. При токе протонов на диафрагме 12 нА максимальное значение тока после капилляра составило 0,26 нА или 2,1 % от входного. При этом «пилообразный» характер диаграммы тока не изменился.



Рис. 3. Диаграмма тока при квазипараллельном пучке протонов на входе в капилляр

Очевидно, что самоорганизации системы пучоккапилляр не произошло, так как накопление заряда на капилляре, обусловленное столкновениями части протонов со стенками капилляра, происходило быстрее, чем его стекание, и приводило к уменьшению количества прошедших капилляр частиц. Таким образом, для самоорганизации системы пучок-капилляр скорость образования объемного заряда, определяемая входным током протонов, и скорость его стекания, обусловленная конструкцией держателя, должны быть одинаковы. При уменьшении входного тока протонов на диафрагме до 1 нА была получена диаграмма тока без характерных для процессов зарядки-разрядки пиков (рис. 4). При этом значение тока после капилляра составило 0,03 – 0,04 нА или ~4 % от входного тока.



Рис. 4. Диаграмма тока при квазипараллельном пучке протонов на входе в капилляр и токе на диафрагме 1 нА

В результате проведенных экспериментов выбран оптимальный режим работы магнитооптической фокусирующей системы установки «Микрозонд» для эффективной фокусировки пучков протонов диэлектрическим капилляром. Фокусирующая система должна обеспечивать квазипараллельный пучок на входе в капилляр, при этом ток протонов на входе в капилляр должен составлять ~ 1 нА. Эффективность передачи протонов через капилляр составила ~4 %, а плотность потока протонов после капилляра увеличилась в 16000 раз.

Литература

1. Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V. et al. //Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. P. 133201.

2. Ikeda, Kanai Y., Kojima T. M., Iwai Y., Kanazawa Y., Hoshino M., Kobayashi T., Pokhil G. P., Yamazaki Y. // J. Phys. Conf. Ser.88, 012031 (2007).

3. Tokihiro Ikeda, Takao M. Kojima, Yoshio Natsume, Jun Kimura, and Tomoko Abe Stable transmission of slow highly charged ions through tapered glass capillary with active discharging method for sub-micron sized beams // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2016, N_{\odot} 133501. P. 109–113.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

<u>Е. Д. Галкин</u>, В. Е. Гаганов, А. В. Андраманов

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

Представлены результаты разработки программы в операционной системе (OC) Astra Linux для управлениями элементами системы автоматической юстировки (САЮ) силового усилителя многоканального неодимового лазера. Программа позволяет управлять шаговыми двигателями, лазерными маркерами через драйвер – блок ввода вывода универсальный и получать изображение с ПЗС-камер. Работа проводилась на полномасштабном стенде, макетирующем силовой усилитель мощной лазерной установки нового поколения. С помощью этой программы можно проводить автоматизированную/ручную юстировку оптических элементов стенда, а также осуществлять тестирование штатных элементов установки.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ идет работа по созданию лазерной установки нового поколения, позволяющей в лазерных мишенях достичь условий термоядерного горения. Одной из составных частей установки является система автоматической юстировки. САЮ предназначена для управления положением и ориентацией в пространстве оптических элементов многоканальной лазерной установки на пути от задающего генератора до мишени, как в автоматическом, так и автоматизированном (по команде персонала) режимах.

Необходимость разработки системы автоматической юстировки для установки определяется как большим количеством (более трех тысяч) оптических элементов, требующих подстройки в каждом опыте, так и конструктивными особенностями их компоновки в канале главного усилителя. Большая часть этих элементов находится в труднодоступных местах; время настройки ограничено дрейфом элементов и количеством персонала настройщиков.

Испытательный стенд САЮ смонтирован в лазерном зале установки «Искра-5» [1]. Стенд включает в себя торцевое зеркало, кюветный пространственный фильтр (КПФ) и транспортный пространственный фильтр (ТПФ), реверсор, блок юстировочного лазера и датчик силового усилителя. В настоящее время почти все элементы стенда являются штатными, за исключением реверсора: зеркала излома на реверсор, линзы реверсора и торцевого зеркала реверсора. Автоматическая юстировка стенда основана на применении системы маркеров на основе лазерных диодов. Маркерами снабжены торцевое зеркало, зеркало реверсора и диафрагменные узлы пространственных фильтров. Центр каждого оптического элемента при этом задается серединой отрезка между световыми маркерами. Изображения маркеров перестраиваются на матрицы цифровых камер, с помощью которых осуществляется контроль взаимного положения центров оптических элементов. Моторизованные оправы оптических элементов и диафрагменные узлы оснащены приводами с шаговыми двигателями.

На создаваемой лазерной установке планируется использовать ОС Astra Linux [2], в связи с чем возникает необходимость разработки программного обеспечения (ПО) для данной ОС.

В ходе выполнения данной работы было разработано ПО, которое дает оператору возможность управлять элементами стенда для юстировки силового усилителя и вращением диафрагменных узлов. С помощью этой программы можно производить автоматизированную (ручную) юстировку в ОС специального назначения Astra Linux и тестировать различные элементы стенда на пригодность для применения в качестве штатных элементов САЮ.

Структурная схема управления САЮ

На рис. 1 приведена предполагаемая структурная схема управления САЮ. Верхний уровень образуют сервер САЮ и местный пульт управления -МПУ САЮ. Они объединены локальной сетью Ethernet со скоростью обмена не ниже 100 Мбит/с. Сюда же могут входить дополнительные рабочие места – МПУ, а также точки доступа для мобильных пультов управления. Взаимодействие с центральным пультом управления (ЦПУ) осуществляется через сервер САЮ. Средний уровень САЮ составляют управляющие компьютеры (УК). В одном варианте для системы юстировки может использоваться 48 УК. При этом один УК производит юстировку четырех каналов силового усилителя и системы транспортировки. В другом варианте для юстировки каждого из 192 каналов установки может применяться УК, встроенный в блок ввода-вывода универсальный (БВВУ), т. е. всего 192 УК.

Связь УК с МПУ осуществляется по распределенной сети со скоростью передачи не менее

100 Мбит/с. Сеть строится на основе Ethernet коммутаторов с оптоволоконным интерфейсом.

Нижний уровень САЮ представляет собой распределенную сеть контроллеров исполнительных механизмов, маркеров и видеокамер.



Рис. 1. Структурная схема управления САЮ

Составные элементы стенда САЮ силового усилителя

В настоящее время на стенде САЮ для управления шаговыми двигателями и лазерными маркерами используется БВВУ производства МГУ (Москва), представленный на рис. 2.

В каждый БВВУ могут устанавливаться три вида модулей, предназначенных для автоматического управления различными подсистемами, которые могут включать в себя:

 – электромоторы различных типов (шаговые двигатели, двигатели постоянного тока);

– лазерные маркеры;

 другие системы требующие управления (камеры, клапаны и пр.).



Рис. 2. Внешний вид БВВУ спереди и сзади

На стенде применяется система маркеров на основе лазерных диодов. Для примера на рис. 3 показан внешний вид лазерного диода QLD-1060-200S. Длина волны излучения составляет 1060 нм, что очень близко к рабочей длине волны создаваемой лазерной установки. Максимальная мощность составляет 200 мВт.



Рис. 3. Внешний вид лазерного диода

Оптические пути распространения излучения от разных маркеров до матрицы цифровой камеры очень сильно различаются. На рис. 4 приведены расстояния от матрицы цифровой камеры до пар маркеров, которые используются во время юстировки оптической схемы усилительного канала. Изображение маркеров КПФЗ попадает на электронную камеру после отражения от зеркала торцевого (ЗТ). Изображение маркеров ТПФ2 попадает на электронную камеру после отражения от зеркала реверсора, а затем от ЗТ. Изображение маркеров ТПФ1 попадает на электронную камеру после прохождения четырех проходов по оптическому тракту усилительного канала, то есть лучи от маркеров ТПФ1 два раза отражаются от ЗТ и один раз от зеркала реверсора [1].



Рис. 4. Расстояния от электронной камеры ДСУ до маркеров

Яркость в изображениях маркеров в паре, может различаться из-за разброса световых характеристик, диаграммы направленности и точности монтажа. В разных режимах юстировки одни и те же маркеры могут светить непосредственно в датчик силового усилителя (ДСУ) или после проходов по тракту – например, если заводящее зеркало ДСУ вбрасывается не в ТПФ4, а в ТПФ2.

Маркеры подключены к модулям Urlaser драйвера БВВУ. Каждый модуль имеет по 4 разъема типа RJ-45, на каждый разъем подключается до 2-х лазерных диодов. Каждый модуль позволяет независимо задавать ток от 0 до 250мА любому из 8-ми лазерных маркеров, что необходимо для выравнивания интенсивности свечения разных маркеров на изображениях с камер.

Все оправы зеркал и диафрагменные узлы, установленные на стенде, оснащены шаговыми двигателями. Они подключены к модулям Urmc драйверов БВВУ.

На рис. 5 приведен внешний вид ДСУ, оснащенного двумя камерами VAC-248-IP. Эти камеры производятся ООО "ЭВС" г. С– Петербург. Камера построена на высокочувствительной матрице КМОП высокого разрешения фирмы ON Semiconductor серии "VITA-2000" [3]. Размер изображения 1920×1200 пикселов. Датчик в камере может работать как в полнокадровом режиме, так и в режиме скользящего электронного затвора. Камера передает изображение без сжатия по сети 100мбит и может управляться от компьютера.

В общем фокусе линз, образующих пространственные фильтры находятся узлы диафрагменные (УД). На рис. 5 представлен внешний вид УД КПФ и УД ТПФ, производства НИИОЭП г. Сосновый Бор.



а

б Рис. 5. Внешний вид: а – УД КПФ; б – УД ТПФ

На диске размещены две кассеты с рабочими диафрагмами [4]. Для уравновешивания диска они располагаются в диаметрально противоположных окнах. Третье окно в диске занято кассетой с внеосевыми маркерами, а в свободное четвертое окно установлен кольцевой противовес. Диск приводится во вращение шаговым мотором посредством ременной зубчатой передачи. Для фиксации диска в четырех положениях, на образующей диска между окон для кассет расположены четыре гнезда для стопорного механизма, который так же приводится в движение шаговым мотором.

Описание работы программы

В рамках поставленной задачи была разработана программа в ОС Astra Linux для тестирования штатных элементов САЮ силового усилителя. При разработке использовалась среда программирования QT Creator [5], программный код реализован на языке C++ [6].

Основное окно программы в соответствии с рис. 6 содержит визуальные элементы, обозначенные выносками.

Функциональное назначение визуальных элементов основного окна:

1) элементы управления камерой:

 – кнопка «Start» – открывает камеру с заданным ІР адресом и портом. Запускает получение изображений с камеры;

 – кнопка «Stop» – останавливает прием изображений с камеры;

– кнопка «Screen» – делает снимок с камеры.
 При нажатии вызывается диалоговое окно сохранения.
 Файл сохраняется в формате «.bmp» с разрешением 1920×1200;

2) область вывода потока изображений с камеры;

3) слайдеры управления экспозицией и усилением:

 с помощью слайдера управления экспозицией пользователь может задавать фиксированные значения для экспозиции. Допустимый диапазон значений для экспозиции от 1 до 190 мс, включительно;

– слайдер усиления позволяет задавать величину для аналогового усиления. Допустимый диапазон значений от 1 до 4, что соответствует усилению в 1, 2, 4, 8 раз;

4) элементы управления параметрами движения двигателей. Пользователь задает количество шагов, на которое необходимо переместиться шаговому двигателю и значение скорости в шагах за секунду;

5) панель состояния шагового двигателя. Отображается значение тока в обмотках шагового двигателя в микроамперах. Рядом с каждым из индикаторов тока, находятся кнопки немедленного отключения тока двигателя вне зависимости от его состояния;



Рис. 6. Главное окно программы: 1 – элементы управления камерой; 2 – область вывода потока изображений с камеры; 3 – слайдеры управления экспозицией и усилением; 4 – элементы управления параметрами движения двигателей; 5 – панель состояния шагового двигателя; 6 – блок активации шаговых двигателей; 7 – клавиши запуска движения шаговых двигателей; 8 – панель управления лазерными маркерами; 9 – панель управления диафрагменными узлами ТПФ и КПФ

6) блок активации шаговых двигателей. Осуществляется открытие и закрытие устройства в модуле ШД БВВУ;

7) клавиши запуска движения шаговых двигателей в нужном направлении и остановки;

8) панель управления лазерными маркерами. Для активации модуля управления ЛД предназначена кнопка «LD ON». Для отмена активации – кнопка «LD OFF». Пользователь может отдельно включить или выключить лазерные диоды ДЗ и БЗ. Также есть кнопки для включения/выключения всех маркеров вместе;

9) панель управления диафрагменными узлами ППФ и КПФ. Для выбора нужного узла активируется соответствующая закладка. Перемещение диска с кассетами осуществляется четырьмя кнопками, соответствующими четырем позициям ротора.

Тестирование программы

Разработанная программа тестировалась при юстировке элементов САЮ силового усилителя. Через модули управления ЛД и ШД в БВВУ подавался ток на лазерные маркеры и осуществлялось вращение требуемых моторов. Разработанная программа доказала свою полезность, при помощи нее были выявлены недостатки в работе БВВУ. При работе с блоком, происходили неоднократные разрывы сетевых соединений, что вызывало в программе индикацию сообщений об ошибках, а также некоторые модули управления шаговыми двигателями приводили к повреждениям обмоток моторов. В связи с этим блок был отправлен на доработку производителю, и проблемы были устранены.

По результатам использования программы сделано заключение о соответствии УД ТПФ и КПФ техническому заданию, диск точно встает в одно из рабочих положений и фиксируется стопором. Управление лазерными маркерами и шаговыми двигателями этих узлов от БВВУ происходит без нареканий.

Видеотрансляция с камер Vac-248-IP осуществлялась без нареканий. Изображения, сохраненные в файлы, при помощи кнопок получения отдельных кадров (скриншотов), в дальнейшем обрабатывались и анализировались. Можно сделать вывод, как и о корректной работе программы с камерами, так и о пригодности самих видеокамер VAC 248-IP.

Заключение

В результате выполнения данной работы была описана общая структура ПО САЮ многоканальной лазерной установки, включающая верхний, средний и нижний уровни; разработана программа, позволяющая пользователю осуществлять автоматизированную (ручную) юстировку элементов стенда силового усилителя; программа протестирована на стенде САЮ с использованием штатных элементов. Программа продемонстрировала корректную работу и оказалась полезна при юстировке. Дальнейшее развитие разаработанного нами ПО предусматривает добавление элементов системы заведения излучения задающего генератора, второго ДСУ, транспортной системы.

Литература

1. Гаганов В. Е., Глушков М. С., Соломатин И. И. Разработка маркерной сети на основе лазерных диодов для системы автоматической юстировки неодимового лазера // III конференция молодых ученых и специалистов «Будущее оптики», Сборник трудов, Санкт-Петербург, 2015. 2. Ключевые особенности Astra Linux Special Edition по реализации требований безопасности информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://astra-linux.com/klyuchevye-osobennosti.html.

3. Черно-белая телевизионная камера высокого разрешения VAC-248-IP. Технический паспорт. ООО" ЭВС" г. Санкт-Петербург.

4. Руководство по эксплуатации узлов диафрагменных КПФ и ТПФ. НИИ ОЭП, г. Сосновый Бор.

5. Qt Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://doc.qt.io/qt-5/QImage.html.

6. Макс Шлее. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. : Издательство «БХВ-Петербург», 2015.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

А. С. Губкин, В. Н. Деркач, А. В. Добиков, В. О. Лащук, В. А. Щеников

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

Введение

Несовершенство технологии изготовления оптических деталей зачастую приводит к возникновению дефектов. В данном докладе речь пойдет о крупных дефектах, таких как пузыри, свили или царапины. В работе рассмотрены два метода, используемых для поиска дефектов, и описана система, построенная на основе этих методов, а также показаны результаты исследования нескольких деталей и возможные варианты дальнейшей модернизации системы

Наличие неоднородностей в деталях, являющихся частью лазерной установки, приводит к возникновению амплитудных и фазовых искажений, а также потерям энергии из-за рассеяния излучения на дефектах. С увеличением мощности установки возрастает и негативное влияние дефектов, которое выражается в том, что снижается оптическая прочность детали. Так как лазерные установки обычно состоят из большого количества последовательных деталей. наличие дефектов в одной из них может привести к повреждению тех деталей, которые расположены после нее. Поэтому к деталям, применяемым в мощных лазерных установках, предъявляются высокие требования, ограничивающие количество и размеры дефектов. В связи с этим задача поиска и паспортизации дефектов является актуальной.

Методы поиска дефектов оптических деталей

Существуют различные методы поиска дефектов: теневые или Шлирен-методы [1, 2], метод торцевой подсветки [3, 4], интерферометрические [5], ультразвуковые [6]. Это принципиально разные методы, отличающиеся областью применения, помехоустойчивостью, сложностью реализации. В данной работе рассматриваются два метода: теневой и торцевой подсветки. Метод торцевой подсветки основан на явлении полного внутреннего отражения. При использовании этого метода деталь освещается с торцов, в результате свет падает на боковые грани детали под малыми углами и полностью отражается. Дефект рассеивает излучение, и изменяет угол падения лучей на грань детали. В результате часть излучения, рассеянного на дефекте, покидает деталь и регистрируется. Схема, иллюстрирующая этот процесс, показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема метода торцевой подсветки: 1 – камера, регистрирующая рассеянное излучение; 2 – дефект; 3,5 – источники излучения; 4 – исследуемая деталь

В теневом методе излучение проходит сквозь деталь и также рассеивается на дефектах. Для того чтобы отделить рассеянное излучение от тех лучей, которые прошли сквозь деталь, не отклонившись, используется теневая диафрагма. Эта диафрагма установлена в фокальной плоскости собирающей линзы, как показано на рис. 2. Те лучи, которые отклонились, рассеявшись на дефекте, не попадают на диафрагму и формируют изображение.



Рис. 2. Схема теневого метода: 1, 2, 5, 7 – линзы; 3 – исследуемая деталь; 4 – дефект, рассеивающий излучение; 6 – теневая диафрагма; 8 – камера

Из рис. 2 видно, что вне зависимости от того, где находится объект, вызвавший отклонение лучей, его изображение будет зарегистрировано. Отсутствие избирательности по типу дефекта является одновременно и достоинством и недостатком теневого метода. С одной стороны этот метод позволяет обнаруживать любые дефекты, приводящие к рассеянию излучения, в том числе расположенные на поверхности, однако выходные изображения при этом зашумлены.

Структура системы

Система состоит из транслятора, микроскопа, камеры, лазера, а также линз и зеркал, ее структурная схема показана на рис. 3. В ее основе лежит следующий принцип: все элементы системы неподвижны, а деталь перемещается относительно них при помощи транслятора, благодаря такому подходу есть возможность исследовать деталь большого размера, разбивая ее площадь на малые участки. В процессе сканирования каждый фрагмент обрабатывается отдельно, а после на основании этих данных составляется общая карта дефектов. В качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер мощностью 60 мВт с длиной волны 0,632 мкм. Размеры пучка, который формируется при помощи двух линз, $10 \times 10 \text{ см}^2$.



Рис. 3. Структурная схема системы: 1 – лазер; 2, 3, 9, 11 – линзы; 4,5 – зеркала; 6 – микроскоп; 7 – транслятор; 8 – деталь; 10 – диафрагма; 12,13 – цифровые камеры

Линзы 9 и 11 имеют фокусные расстояния 1500 и 500 мм соответственно, диаметр теневой диафрагмы – 6 мм.

В случае использования торцевой подсветки схема максимально упрощается, на определенном расстоянии от детали, помещенной в специальную оправу, устанавливается камера. Расстояние между камерой и деталью выбрано таким образом, чтобы поле зрения камеры в плоскости детали было таким же, как при теневом методе. Это ограничение введено для того, чтобы снимки имели одинаковый масштаб, при этом в случае использования торцевой подсветки поле зрения не ограничено размерами лазерного пучка и может быть увеличено в несколько раз, что приведет к увеличению скорости сканирования. Торцевая подсветка детали реализована при помощи специальной оправы, в пазы которой уложена светодиодная лента. Светодиоды подобраны таким образом, чтобы максимум их спектра излучения находился далеко от линий поглощения неодимового фосфатного стекла.

Процесс исследования детали состоит из двух этапов, на первом этапе происходит фотографирование фрагментов, затем на изображении каждого фрагмента оператором отмечаются точки, в которых может находиться дефект. Основная проблема такого подхода состоит в том, что на данном этапе невозможно однозначно определить является ли отмеченная точка дефектом, поэтому на следующем этапе каждая отмеченная точка проверяется при помощи микроскопа. По сохраненным в памяти программы координатам деталь перемещается таким образом, чтобы проверяемая точка попала в поле зрения микроскопа, размеры которого 2×2 мм². Так как третья координата не может быть получена из исходного изображения, деталь перемещается вдоль оси микроскопа до тех пор, пока не будет получено резкое изображение дефекта, его измерение осуществляется по изображению, полученному с микроскопа. Точность измерения обеспечивается за счет калибровки, для этого в поле зрения микроскопа помещается специальная мира и вычисляется масштаб изображения. Фотографирование фрагментов занимает 40-60 минут, длительность второго этапа исследования зависит от количества отмеченных точек.

Виды дефектов оптических деталей

Все дефекты делятся на две группы: внутренние и поверхностные. К поверхностным дефектам относятся сколы и царапины, которые возникают в процессе транспортировки или эксплуатации детали. Как правило, такие дефекты видны даже невооруженным взглядом. Сюда же можно отнести припекшуюся грязь на поверхности детали, она не является дефектом, но затрудняет поиск реальных дефектов, так как вызывает рассеяние излучения. На рис. 4 показано, как выглядят эти загрязнения.

Внутренние дефекты возникают в процессе варки и, в отличие от поверхностных дефектов, не могут быть устранены путем полировки детали. Часто встречаются два вида внутренних дефектов: пузыри и свили. Свиль – это неоднородность показателя преломления стекла, обычно имеет нитевидную форму. Следовательно, при прохождении света через такой дефект лучи преломляются, а угол преломления тем больше, чем больше разница показателей преломления. При использовании теневого метода минимальная разница показателей преломления определяется размерами теневой диафрагмы и качеством используемых линз. Пример изображения свиля, полученного теневым методом показан на рис. 5. Метод торцевой подсветки не позволяет обнаруживать свили, так как разница показателей преломления между дефектом и нормальным стеклом очень мала. Порядок величины $\Delta n - 10^{-3}$, поэтому преломившиеся лучи не покидают деталь.





8

Рис. 4. Объекты на поверхности детали, изображения получены при помощи микроскопа: а – дефект неправильной формы размером 100 мкм, б – круглый объект «капля» – размером 200 мкм, в – дефект, имеющий зернистую структуру размером 120 мкм



Рис. 5. Инвертирование изображение нитевидного свиля

Следующий вид дефектов – это пузыри. Небольшие включения газа (воздуха или оксидов серы и углерода), которые возникают в процессе варки и также как и свили рассеивают излучение. Однако в этом случае рассеяние происходит под большими углами, из-за того, что разница показателей преломления стекла и воздуха значительно больше, поэтому независимо от того, какой из рассматриваемых методов используется пузыри видны. На рис. 6 показаны увеличенные изображения пузырей, диаметр самого крупного из них – 355 мкм.





Рис. 6. Изображения пузырей, полученные при помощи микроскопа: а – пузырь диаметром 120 мкм, б – пузырь диаметром 180 мкм

Сравнение методов

С целью сравнить два методов поиска дефектов были исследованы плоскопараллельных детали из неодимового фосфатного стекла, все эти элементы содержат пузыри и имеют различное состояние поверхности. Количество найденных пузырей и время, затраченное на аттестацию, характеризуют эффективность метода. На изображениях, полученных с применением торцевой подсветки, отмечались все точки, на изображениях, полученных теневым методом, отмечались только те, которые наиболее похожи на пузырь. Если не выбирать точки, а отмечать все, то время поиска теневым методом возрастет на порядок, так как при использовании этого метода на изображении присутствует множество объектов, находящихся на поверхности детали. Так как важна именно совокупность параметров, можно ввести новый параметр k, учитывающий количество найденных дефектов и время, затраченное на поиск, под дефектами в данном случае понимаются точечные дефекты, расположенные внутри детали:

$$k = \frac{n}{Nt},\tag{1}$$

где *n* – число найденных дефектов; *N* – общее количество дефектов; *t* – затраченное время.

На рис. 7 и 8 показаны инвертированные изображения одного и того же фрагмента, полученные разными методами, окружностями выделены дефекты.



Рис. 7. Фрагмент дискового активного элемента, инвертированное изображение, полученное теневым методом



Рис. 8. Изображение, полученное с использованием торцевой подсветки

Результаты исследования деталей приведены в таблице, видно, что, несмотря на примерно одинаковое время поиска, по совокупности параметров метод торцевой подсветки во всех случаях оказался лучше именно для поиска точечных дефектов. Такой результат объясняется тем, что на изображении, полученном теневым методом много «ложных» сигналов. При этом преимущество теневого метода в том, что он позволяет обнаруживать свили и царапины.

	Теневой метод		Торцевая подсветка			
ДАЭ	Найдено пузырей/ всего	Время, мин	k	Найдено пузырей/ всего	Время, мин	k
144	3/16	59	3,2	16/16	63,5	15,7
7	6/15	60,5	6,6	15/15	42,5	23,5
110	1/6	80	2,1	6/6	51,5	19,4

Заключение

В ходе работы функциональность системы поиска дефектов была расширены при помощи введения торцевой подсветки. Для того, чтобы сравнить методы проведено сканирование 3 различных ДАЭ двумя различными методами: теневым и с торцевой подсветкой. Сравнение методов показало, что чистота поверхности существенно влияет на поиск пузырей теневым методом и практически не оказывает влияния при использовании торцевой подсветки. Еще одно преимущество торцевой подсветки в том, что засвечивается вся деталь одновременно и поле зрения фотоаппарата может быть увеличено, что приведет к увеличению скорости сканирования. В то же время теневой метод, несмотря на помехи, вызванные поверхностными загрязнениями, позволяет обнаруживать свили и царапины.

Добиться хороших результатов при использовании теневого метода можно, если обеспечить близкую к идеальной чистоту поверхности детали.

Другой вариант – снижение глубины резкости выходного изображения, так как в настоящий момент по изображению невозможно определить где находится объект. Желаемого результата можно добиться двумя способами: увеличить отношение f_2/f_1 выходного телескопа, которое в настоящий момент составляет 0.33. либо использовать объектив с большим фокусным расстоянием. После этого предлагается делать два снимка детали, перемещая ее на некоторое расстояние по глубине, в том случае, если глубина резкости будет меньше чем толщина детали, объекты, находящиеся на поверхности, будут видны только на одном изображении. После этого, объединяя два изображения, можно получить одно, на котором останутся только те объекты, которые есть на обоих изображениях. Недостатком такого подхода является неизбежное уменьшение поля зрения и, соответственно, увеличение числа фрагментов и времени сканирования. Чтобы обеспечить быструю и полную аттестацию детали нужно применять одновременно оба метода.

Литература

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985.

2. Васильев Л. А. Теневые методы. М.: Наука, 1968.

3. Rainer F. Mapping and Inspection of Damage and Artifacts in Large-Scale Optics.// LLNL. December 22, 1997.

4. Prasad R. R., Bernacil M., Halpin J., at al. Design of an Illumination Technique to Improve the Identification of Surface Flaws on Optics // LLNL, November 11, 2004.

5. Schmit J.Large-surface defect detection by singleframespatial-carrier interferometry//United States Patent №.: US 8,275,573 B1. 2012

6. Жималов А. Б., Горина И. Н., Сучков С. Г., Селифонов А. В., Сучков Д. С., Николаевцев В. А. Инновационный неразрушающий метод ультразвукового контроля нано- и микротрещин и дефектов в листовом стекле // Вестник ВолГУ. 2009–2010. Серия 10. Вып. 4. С. 52–58.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО МАГНИТА МАСС-СЕПАРАТОРА С-2

<u>Н. Е. Гурин</u>, А. В. Курякин, А. Д. Тумкин, С. В. Фильчагин, О. П. Вихлянцев, Ю. В. Рычков, Н. В. Катаев

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

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по модернизации систем электромагнитного масс-сепаратора С-2. Одной из таких критически важных систем является система управления током магнита. Диспергирующий магнит масс-сепаратора предназначен для создания магнитного поля с напряженностью $3,6 \times 10^5$ А/м и конфигурацией, необходимой для разделения изотопов [1]. Качество разделения изотопов элемента зависит от стабильности магнитного поля сепаратора. Качество магнитного поля, в свою очередь, определяется качеством питания электромагнита.

Действующая схема управления током магнита построена на принципе мотор-генератор и состоит из мотора, генератора, измерительного шунта, шунта стабилизации, схемы сравнения, модулятора и четырехдекадного потенциометра, устанавливающего опорное напряжение. Частота вращения асинхронного двигателя в свою очередь регулируется через обратную связь от тока, протекающего в магните. Установка тока магнита производится оператором с пульта управления масс-сепаратором С-2 посредством галетных переключателей. Недостатком данной схемы управления является то, что при существующим дрейфе тока на уровне ~ 50 мА/час его необходимо постоянно вручную компенсировать в процессе разделения изотопов.

Результатом разработки и изготовления автоматизированной системы управления (АСУ) током диспергирующего магнита масс-сепаратора С-2 является:

• повышение точности установки и поддержания тока магнита (исключение ручного управления);

• уменьшение пульсации выходного тока (за счет использования современного источника тока).

Диспергирующий магнит масс-сепаратора С-2

Масс-сепаратор С-2 предназначен для лабораторного разделения изотопов химических элементов. Разделение изотопов осуществляется электромагнитным методом, который основан на том, что в поперечном магнитном поле ионы полиизотопного элемента, обладающие одинаковыми энергиями, но различными скоростями из-за различия масс, движутся по окружностям, радиус которых зависит от масс изотопов.

Отклоняющие электромагнитное поле обеспечивается электромагнитом (рис.1), входящим в состав масс-сепаратора С-2. Катушки электромагнита имеют по 192 витка, что обеспечивает создание магнитного поля с напряженностью $3,6 \times 10^5$ А/м при токе 220 А. Обмотки катушек выполнены из полой медной шины сечением ($13,5 \times 13,5$) мм² с отверстием диаметром 8 мм для охлаждения водой. Суммарное активное сопротивление обмоток катушек – 0,2 Ом, индуктивность – 7,5 мГн. По данным параметрам была подобрана модель программно-управляемого источника тока.



Рис. 1. Электромагнит масс-сепаратора С-2

Структура АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Создание нового автоматизированного источника питания магнита масс-сепаратора С-2 предусматривает замену морально и физически изношенного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры на современные. Предусмотрено оснащение источника системой контроля и управления, позволяющей автоматизировать все операции измерения технологических параметров источника и большинство операций управления. На рис. 2 представлена блок-схема нового автоматизированного источника питания магнита масс-сепаратора С-2.

В качестве источника питания магнита масс-сепаратора С-2 используется программно-управляемый источник постоянного тока Sorensen SGI 60x250 производства фирмы Ametek. Данные источники питания специально разработаны для использования в системах, в которых требуется программноуправляемые источники постоянного тока с хорошими выходными характеристиками, такими как высокая точность установки и регулировки, низкий уровень пульсаций и шума выходных параметров. Связь источника тока с управляющим компьютером осуществляется через последовательный порт компьютера по интерфейсу RS-232.

Так как источник питания работает на индуктивную нагрузку (магнит масс-сепаратора С-2), то для предотвращения его повреждения вследствие возникновения самоиндукции при резком изменении тока, выходы источника тока подключены к магниту через диодную защиту (VD1, VD2 см. рис. 2). Диод VD1 защищает выход источника питания от пробоя при возникновении самоиндукции. Диод VD2 будет открыт при возникновении обратной ЭДС, таким образом ток, шедший через индуктивность, продолжит течь через диод, а накопленная энергия магнитного поля рассеется на нем, не вызывая повреждение источника тока [2]. Диод VD1 при работе находится в открытом состоянии и на нем выделяется около 160 Вт тепла при нормальном режиме работе, поэтому он закреплен на радиаторе и обеспечено его принудительное воздушное охлаждение. В качестве защитных диодов используются диоды Д161-320-12.

Источник питания подключается к питающей сети через контактор КМИ 34062 (QF1 см. рис. 2), который обеспечивает дистанционное включение/выключение и защиту от короткого замыкания или сверхтока с помощью теплового реле.

В качестве независимого измерителя тока, протекающего через магнит масс-сепаратора С-2, используется компенсационный датчик тока LEM ITB 300-S (PA1 см. рис. 2). Этот тип датчиков относится к бесконтактному типу измерителей тока. Традиционно, данный тип датчиков используется как элемент обратной связи в высокоточных и высокостабильных источниках питания для обеспечения высокой точности и линейности измерения тока, при низком температурном коэффициенте на широкой полосе пропускания. Принцип действия такого датчика заключается в следующем: магнитный поток, создаваемый измеряемым током, компенсируется таким же потоком, создаваемым током во вторичной обмотке датчика. Выходной (компенсирующий) ток генерируется с помощью элемента Холла и электроники датчика. Этот ток является пропорциональной копией первичного тока, уменьшенной в 2000 раз. Таким образом при диапазоне измеряемых токов от минус 300 до 300 А выходной ток датчика меняется от минус 150 до 150 мА.

Для дистанционного включения/выключения, контроля работы программно-управляемого источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250, подачи питания и контроля тока с токового датчика LEM ITB 300-S, используется блок контроля и управления A2 (см. рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Связь модуля аналогового ввода I-7012 (см. рис. 2) с управляющим компьютером осуществляется через последовательный порт по интерфейсу RS-232. Для преобразования интерфейса RS-232 в RS-485 используется модуль преобразователя интерфейса I-7520 (см. рис. 2). Модуль аналогового ввода I-7012 имеет один канал аналогового ввода (используется для контроля значений тока с токового датчика LEM ITB 300-S), один канал дискретного ввода (используется для контроля срабатывания теплового реле контактора КМИ-34062) и два канала дискретного вывода (используются для включения/выключения источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250 через контактор КМИ-34062).

Программное обеспечение АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Для автоматизированного управления током магнита масс сепаратора создано рабочее программное обеспечение (РПО). Разработка РПО проведена с использованием инструментального программного пакета CRW-DAQ [3], предназначенного для автоматизации экспериментальных установок и физических измерений. Пакет содержит набор средств, необходимых для создания графических интерфейсов, средства для программирования алгоритмов контроля и управления (язык DAQ Pascal), а также библиотеки драйверов для работы с модулями удаленного вводавывода серии І-7000. Следует отметить, что разработанное РПО полностью соответствует принципам модульности, используемым для построения сетевой структуры системы контроля И управления масс-сепаратором С-2, и легко интегрируется в единую систему управления.

В задачи РПО АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 входит:

 – управление и контроль выходных параметров программно-управляемого источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250;

– дистанционное включение/выключение источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250;

- контроль срабатывания теплового реле;

- контроль тока, протекающего в магните, измеряемого токовым датчиком LEM ITB 300-S;

 непрерывное сохранение данных измеренных величин в файлах на жестком диске компьютера;

 отображение результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем и графиков.

Для управления программно-управляемым источником постоянного тока Sorensen SGI 60x250 разработан драйвер, который входит в состав РПО. В алгоритме драйвера реализован цикл команд, выполняющий постоянный опрос устройства и отправку команд для исполнения. На рис. 3 показан графический

интерфейс (мнемосхема) драйвера программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60х250. Данная мнемосхема обеспечивает полное управление и контроль источника тока. При нажатии сенсоров ввода данных (сенсоры установка по току, напряжению, темп перехода и т. д. см. рис. 3) появляется поле редактирования для задания новых целевых значений параметров источника тока (установки напряжения, тока, темпа перехода и ограничивающие пределы по току и напряжению и т. д.). При нажатии сенсоров вывода данных (сенсоры измеренного тока, напряжения, мощности и т. д. см. рис. 3) появляется окно с графиком измеренных значений интересующих параметров (напряжения, тока, мощности и т. д.).



Рис. 3. Мнемосхема драйвера программно-управляемого источника тока

Для возможности работы источника тока на индуктивную нагрузку (режим стабилизации тока) в драйвере источника реализован режим плавного изменения выходных параметров с заданной скоростью перехода. Плавное изменение выходных параметров (сенсоры «Темп перехода A/с» и «Темп перехода B/с» см. рис. 3) необходимо для того, чтобы избежать опасных импульсов напряжения при работе на индуктивную нагрузку (при работе с индуктивной нагрузкой надо плавно наращивать ток).

Разработанное РПО позволяет работать, как непосредственно с драйвером программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250, так и с блоком управления и контроля. Для упрощения работы оператора с АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 большинство функций, связанных с управлением, автоматизированы и требуют от оператора только команды на включение/выключение управляемого источника тока и задания необходимой величины тока магнита.

На рис. 4 показана мнемосхема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2. Данная мнемосхема позволяет оператору включать/выключать и контролировать текущее состояние программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60х250, устанавливать необходимое значение тока магнита, контролировать ток, протекающий в магните, при помощи токового датчика LEM ITB 300-S, выполнять аварийное выключение источника тока в случае необходимости.



Рис. 4. Мнемосхема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Контроль и задание выходных параметров программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250 осуществляется при помощи сенсоров «Текущее напряжение, В», «Ограничивающие напряжение, В», «Текущий ток, А» и «Установка тока, А» в поле «Источник тока SORENSEN SGI» (см. рис. 4). Оператор может задавать установку тока магнита, щелкнув левой кнопкой «мыши» по сенсору «Уставка тока, А», а ограничивающие напряжение устанавливается автоматически на заданное значение, так как источник тока магнита масс-сепаратора работает в режиме стабилизации тока.

Для дополнительного контроля тока, протекающего в магните масс-сепаратора, в поле «Контроль тока по датчику LEM», в сенсоре «Текущий ток, А», отображается текущее значение тока, измеренное датчиком LEM ITB 300-S. Выходной сигнал с токового датчика через измерительный резистор поступает на вход модуля аналогового ввода I-7012 (см. рис. 2). Измеренное модулем падение напряжение на резисторе, с помощью процедуры калибровки, преобразуется в значение тока и отображается в сенсоре «Текущий ток, А».

Алгоритмы включения/выключения источника тока показаны на рис. 5. Реализация данных алгоритмов в РПО позволяет полностью автоматизировать безопасные режимы включения/выключения источника тока и установки необходимого значения тока магнита. То есть, при включении источника, программа автоматически выполняет действия, необходимые для включения источника тока, устанавливает определенные параметры, и, при задании оператором значения тока магнита, обеспечивает плавную установку тока с определенной скоростью до заданной величины, предотвращая таким образом возникновение самоиндукции. При выключении источника, соответственно, программа плавно (с определенной скоростью) устанавливает ток и напряжение магнита в нулевое значение и выполняет необходимые для выключения действия. Кроме того, предусмотрен режим аварийного выключения источника тока. При таком выключении элементы системы управления испытывают значительные нагрузки в результате возникновения обратной ЭДС вследствие моментального снятия тока с катушки магнита, поэтому аварийным выключением следует пользоваться только в экстренных случаях, требующих незамедлительного выключения тока магнита.



Рис. 5. Алгоритмы включения/выключения источника тока

Для аварийного (моментального) выключения источника тока используется кнопка «Аварийное выключение», которая располагается на мнемосхеме управления током магнита масс-сепаратора (см. рис. 4). При нажатии данной кнопки появляется диалог с запросом подтверждения действия оператора, обеспечивая таким образом защиту от случайного нажатия. В случае подтверждения аварийного выключения источника, будет выполнено его выключение, и снятие с него питающего напряжения.

Проведение испытаний АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Для проверки работоспособности ACУ током магнита масс-сепаратора C-2 были проведены ее испытания при рабочих токах магнита в ходе разделения изотопов свинца. Измерения тока, протекающего в магните, производились согласно схеме, изображенной на рис. 2, за исключением того что токовый сигнал датчика LEM ITB 300-S с измерительного резистора подавался не на модуль аналогового входа I-7012, а на цифровой мультиметр FLUKE 8846A. Цифровой мультиметр FLUKE 8846A. Цифровой мультиметр FLUKE 8846A имеет погрешность измерений $\pm 0,0017$ % на диапазоне 10 В, в то время как модуль аналогового входа I-7012 только $\pm 0,05$ %. Таким образом, используя мультиметр

FLUKE, удалось более точно измерить стабильность тока магнита масс-сепаратора.

Данные, измеряемые цифровым мультиметром, записывались на внешнюю карту памяти, которая подключалась к нему через порт USB. Затем полученные данные обрабатывались на персональном компьютере. Значение падения напряжения на измерительном резисторе через калибровку переводилось в значение тока в магните масс-сепаратора.

Испытания проводились путем задания тока магнита масс-сепаратора С-2 200 А (типичный ток для разделения изотопов свинца). Установка тока производилась со скоростью 2,5 А/с. Полученные результаты показаны на рис. 6, где:

а) график тока магнита при установке его значений с 0 до 200 А;

б) график тока магнита после его установки на значение 200 А.

Как видно из рис. 6б после установки рабочего тока магнита требуется время порядка 10 минут на температурную стабилизацию магнита масс-сепаратора, даже при условии того, что магнит имеет водяное охлаждение.

Измеренное распределение значений тока после прогрева магнита (см. рис. 7а) показало, что оно хорошо описывается нормальным распределением Гаусса, а среднеквадратичное отклонение от заданного тока составляет 0,001481 A (1,481 мA).



Рис. 6. Ток магнита масс-сепаратора: а – процесс установки тока магнита 0 – 200 А; б – ток магнита в установившемся значении



Рис. 7. Распределение тока магнита масс-сепаратора С-2: а – распределение значений тока АСУ; б – распределение значений тока старой системы мотор-генератор

Ранее было измерено значение тока магнита масс-сепаратора при использовании старой системы мотор-генератор. Как видно из рис. 76, распределение тока так же хорошо описывается нормальным распределением Гаусса, но среднеквадратичное отклонение от заданного вручную тока составляет 0,006686 A (6,686 мA).

Приведенные измерения показали, что разработанная АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 позволила повысить стабильность тока магнита практически в 5 раз, и соответственно в 5 раз снизить пульсацию тока от заданного значения.

Вывод

В результате создания АСУ током магнита масссепаратора С-2 значительно повысились его эксплуатационные характеристики и уровень автоматизации управления:

• обеспечена работа диспергирующего магнита в режиме автоматического поддержания тока и исключен долговременный дрейф тока. Таким образом, оператору больше не нужно визуально контролировать изменение значения тока магнита по стрелочному амперметру и вручную выполнять компенсацию дрейфа тока во время разделения изотопов.

• в 5 раз снизилась величина уширения пучка в фокальной плоскости, за счет уменьшения пульсаций тока магнита, обеспечивая таким образом более эффективное разделение изотопов и, тем самым, снижая стоимость их получения.

• повышена точность установки тока магнита в 10 раз за счет уменьшения шага уставки. На старой системе минимальный шаг уставки составлял 50 мА, а при использовании программно-управляемого источника тока, минимальный шаг снизился до 5 мА.

Литература

1. Vesnovskii S. P., Polynov V. N. Highly enriched isotopes of uranium and transuranium elements for scientific investigation // NIM B 1992. Vol. 70. P. 9–11.

2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники Т. 1. М.: Мир, 1984.

3. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 80–90.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО НF/DF-ЛАЗЕРА С НЕУСТОЙЧИВЫМ ОПТИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Э. А. Деменкова, Н. А. Зарецкий, И. Н. Червяков, В. В. Щуров

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

Для большого числа научных и прикладных задач требуется лазерное излучение высокой яркости, достигаемое обычно путем сужения диаграммы направленности. Одним из путей получения малой расходимости излучения может быть осуществление режима генерации на одной поперечной моде, причем желательно, чтобы индекс этой моды был минимальным.

Наиболее простым методом реализации одномодовой генерации [1] является применение неустойчивого телескопического резонатора с большим значением числа Френеля $N = a^2/4\lambda L >> 1$, здесь a поперечный размер, $\lambda -$ длина волны, L - длина активной среды.

Эффективность применения такого резонатора наглядно продемонстрирована в большом ряде работ. Однако, этого еще недостаточно для получения малой расходимости излучения. В реальных системах распределение поля отличается от идеального вследствие существования в активной среде оптических неоднородностей и искажений поверхности зеркал. В химических лазерах, кроме того, генерация идет на большом числе переходов возбужденных молекул HF(DF). Излучаемые спектральные линии имеют разные задержку, длительность и интенсивность, и это накладывает свои отпечатки на суммарную расходимость излучения.

Настоящая работа посвящена изучению расходимости излучения электроразрядного химического HF(DF)-лазера. Лазер работал на нецепной химической реакции фтора с водородом (дейтерием) в смеси состава SF₆:H₂(D₂) = 9:1. Инициирование реакции осуществлялось объемным электрическим разрядом в двухэлектродной системе. Оптическая схема измерения лазерных параметров строилась, исходя из задач эксперимента. При работе с водородными смесями учитывалось поглощение излучения парами воды, содержащейся в атмосфере.

На лазере с длиной активной среды $L_a = 65$ см были проведены эксперименты при постановке в лазер неустойчивого резонатора (HP) телескопического типа с кратностью телескопа M = 2,5. Для определения энергетической расходимости излучения применялась оптическая схема измерений, основанная на методе калиброванных диафрагм. Схема приведена на рис. 1.

Диафрагма 9 устанавливалась в фокусе сферического зеркала 7, всего применялось 9 различных диафрагм с диаметрами отверстий от 0,66 до 5,06 мм. Измерители энергии 10 и 11 находились на одинаковом расстоянии от сферического зеркала, чтобы при работе с HF-лазером не учитывать поправки на поглощение в атмосфере.



Рис. 1. Схема экспериментов по определению угловой расходимости излучения: 1 – лазер; 2, 3 – зеркала неустойчивого резонатора; 4 – лазер юстировочный; 5 – плоские зеркала; 6 – пластина из CaF₂; 7 – зеркало сферическое, *F* = 10 м; 8 – клинья из CaF₂; 9 – диафрагма; 10 – измеритель полной энергии импульса; 11 – измеритель энергии, прошедшей через диафрагму

Результаты экспериментальных измерений и расчетов по программе Fresnel для идеального резонатора приведены на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость доли энергии, прошедшей через диафрагму, от расходимости излучения: точки – эксперимент, кривые – расчет

Видно, что расходимость обоих типов лазера (НF и DF) практически одинакова, но расчетные зна-

чения выше экспериментальных, в особенности при малых углах расходимости. С одной стороны, уменьшение может быть обусловлено большой погрешностью при наведении оси излучения на центр диафрагмы с малым диаметром отверстия. С другой стороны, скорее всего, искажения дальней зоны излучения связаны с не идеальностью оптических элементов, так как в работе [2] расчетным путем показано, что влияние неоднородностей накачки на расходимость выходного излучения пренебрежимо мало.

При исследовании спектрального состава излучения электроразрядного химического лазера [3] было обращено внимание на то, что ожоги от разных спектральных линий на термоэкране, установленном в фокальной плоскости сферического зеркала имеют разные диаметры. Регистрограммы приведены в табл. 1.

Таблица 1





Ряд пятен имеет четко выраженный керн, в ряде пятен керн отсутствует. Причем, наблюдалась тенденция к появлению керна у линий с большими вращательными квантовыми числами *j*. Из работы [3] следует, что с увеличением *j* растет задержка генерации на переходе, следовательно, эти линии находятся в конце импульса генерации.

С НF лазером были проведены эксперименты по изучению расходимости отдельных линий методом калиброванных диафрагм. Были выбраны две линии перехода 2-1 с разными временными параметрами: $P_2(5)$ с длительностью $t \approx 80$ нс и задержкой генерации $\Delta t \approx 30$ нс; и $P_2(8) - t \approx 250$ нс и $\Delta t \approx 80$ нс. Результаты измерений приведены на рис. 3, там же дано расчетное соотношение энергий линий при разной расходимости.



Рис. 3. Расходимость излучения отдельных спектральных линий HF-лазера и соотношение их долей энергии

Видно, что расходимость уменьшается с ростом задержки генерации на переходе и длительности импульса излучения. Отношение долей энергии линий тем выше, чем меньше расходимость излучения (диаметр диафрагмы), при больших диаметрах диафрагмы оно приближается к единице.

Если линии имеют разную расходимость, то это должно сказаться и на поведении общей расходимости излучения в течение лазерного импульса.

В этой связи были поставлены эксперименты по изучению изменения расходимости лазерного импульса во времени. Схема измерений показана на рис. 4.



Рис. 4. Схема измерений изменения расходимости: 1 – лазер; 2, 3 – зеркала резонатора; 4, 5 – клинья из CaF₂; 6 – зеркало сферическое *F* = 10 м; 7 – диафрагма *d* = 1 мм; 8, 9 – диффузно рассеивающие экраны; 10,11 – фотоприемники,12 – линза; 13 – измеритель энергии

Суммарный импульс лазерного излучения регистрировался фотоприемником 10, он применялся нами как репер по времени.

Часть излучения, отраженная от клина 4, подавалась на сферическое зеркало 6, которое фокусировало его на диафрагму 7. Прошедшее через диафрагму излучение регистрировалось фотоприемником 11. Была выбрана диафрагма с диаметром отверстия 1 мм, которая, согласно данным рис. 2, должна пропускать около 60 % энергии всего импульса.

Проводилось несколько экспериментов с диафрагмой, затем она убиралась и снова проводились эксперименты. Отметим сразу, что амплитуды и формы импульсов лазерного излучения в нескольких последовательных измерениях абсолютно идентичны.

Если расходимость в течение импульса изменяется, то должно изменяться и соотношение сигналов с фотоприемника 11, зарегистрированных с диафрагмой и без нее.

На рис. 5 представлены типичные импульсы с фотоприемников 10 и 11.



Рис. 5. Осциллограммы импульсов излучения: а – без диафрагмы; б – за диафрагмой

На рис. 5а сдвижка импульсов по времени объясняется тем, что оптическая длина пути от выходного зеркала лазера до фотоприемника 10 равна 10 м, а до фотоприемника 11 – 28 м. Разница в 18 м дает задержку 60 нс. На рис. 5б на сигнале за диафрагмой виден предымпульс, появление его можно объяснить, обратившись к рис. 4. Свечение разряда между электродами отражается от алюминиевой диафрагмы поз. 7 и попадает на фотоприемник 11. При закрывании диафрагмы экраном предымпульс пропадает.

На рис. 6 приведены совмещенные по времени импульсы мощности излучения без диафрагмы и за диафрагмой.



Рис.6. Импульсы мощности излучения без диафрагмы и за диафрагмой

Из рис. 6 видно, что за диафрагмой первые примерно 30 нс излучения практически нет, хотя в этом же месте без диафрагмы фотоприемник излучение фиксирует. Следовательно, в это время расходимость излучения настолько велика, что в отверстие диафрагмы, регистрирующей излучение с расходимостью не более 10^{-4} рад, попадает лишь ничтожная доля энергии. Зависимость от времени доли энергии (ΔE), приходящей на фотоприемник без диафрагмы и отношение энергии за диафрагмой к энергии без диафрагмы (E_{3a}/E_{6e3}) приведена на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость от времени доли энергии (Δ*E*), приходящей на фотоприемник без диафрагмы и отношение энергии за диафрагмой к энергии без диафрагмы (*E*_{за}/*E*_{без})

Из рис. 7 видно, что примерно лишь через 100 нс после начала импульса излучения через диафрагму начинает проходить ≈ 60 % энергии, а эта величина совпадает с калориметрическими измерениями.

Причина, по которой в начале импульса излучения расходимость велика, может заключаться в про-
цессе формирования диаграммы направленности излучения.

В простейшем геометрическом приближении, без учета неоднородностей усиливающей среды, время формирования диаграммы направленности излучения равно

$$t_{\Phi} \approx \frac{l}{c} \ln \left[4a_0^2 \frac{M-1}{\lambda l} \right] \frac{1}{\ln M}, \tag{1}$$

где λ – длина волны излучения, м; l – длина резонатора, м; $2a_0$ – размер сечения усиливающей среды, м; M – коэффициент увеличения телескопического резонатора; c – скорость света.

Для нашего лазера расчет дает величину $t_{\Phi} \approx 120$ нс, что согласуется с данными рис. 7.

За время, пока формируется диаграмма направленности, согласно данным рис. 7, излучается около 20 % энергии. При большой расходимости излучения только малая ее доля проходит через диафрагму, и чем меньше диаметр диафрагмы, тем эта доля меньше.

Вернемся теперь к графикам на рис. 3. На основании их был сделан вывод о том, что расходимость уменьшается с ростом длительности импульса и задержки генерации на переходе.

На рис. 8 приведены взятые из работы [3] зависимости мощности (W) данных линий и расчетные зависимости доли энергии (ΔE) от времени.



Рис. 8. Зависимости мощности отдельных спектральных линий и расчетная зависимость доли энергии от времени: а – на переходе P₂(5); б – на переходе P₂(8)

Если принять, что диаграмма направленности формируется за 120 нс, то за это время на переходе $P_2(5)$ излучится практически вся энергия, на переходе $P_2(8) \approx 20$ %. Следовательно, при малых диаметрах отверстия за диафрагмой на переходе $P_2(5)$ будет регистрироваться меньшая доля энергии, чем на переходе $P_2(8)$, что и подтверждается данными рис.3.

Для проверки предположения о влиянии времени формирования диаграммы направленности на расходимость излучения были проведены эксперименты на лазере с меньшей длиной активной среды (28 см) и с другим типом резонатора. Параметры резонаторов обоих лазеров и расчетные времена формирования в них диаграммы направленности излучения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры резонаторов

Тип лазера	М, отн. ед.	<i>L</i> _р , м	2 <i>a</i> ₀ , см	<i>t</i> _ф , нс
Ι	2,5	1,976	15	120
II	4,25	0,573	8	20

На рис. 9 приведены импульсы генерации за диафрагмой и без нее для лазера типа II.



Рис. 9. Импульсы мощности лазера типа II за диафрагмами разных диаметров

Видно, что задержка импульса за диафрагмой практически отсутствует, так как время формирования диаграммы направленности излучения здесь мало.

В заключении можно сказать, что на установке электроразрядного химического лазера с неустойчивым телескопическим резонатором проведены экспериментальные и расчетные исследования энергетической расходимости излучения в моноимпульсном режиме работы HF- и DF-лазера. Отличие экспериментальных результатов от расчетов связано с не идеальностью поверхности зеркал оптического резонатора. При работе с водородными смесями учитывалось поглощение излучения парами воды, содержащейся в атмосфере.

Экспериментально изучена расходимость отдельных спектральных линий. Также представлены регистрограммы фокальных пятен различных линий. Показано, что расходимость излучения спектральной линии тем лучше, чем больше ее длительность, то есть чем выше значение вращательного квантового числа *j*.

Проведено экспериментальное изучение изменения расходимости излучения HF-лазера во времени. Показано, что в заданном телесном угле расходимость возрастает от нуля до максимального стационарного значения за ≈ 30 нс, что соответствует времени заполнения расходящейся волной всего активного объема.

Также для проверки предположения о влиянии времени формирования диаграммы направленности на расходимость излучения были проведены эксперименты на лазере с меньшей длиной активной среды и с другим типом резонатора. Здесь задержка импульса за диафрагмой практически отсутствует, так как время формирования диаграммы направленности излучения в данном случае мало.

Изучено изменение расходимости во времени суммарного импульса и импульсов отдельных спектральных линий. Показано, что расходимость выходит на стационарный уровень через определенное время формирования диаграммы направленности, зависящее от параметров резонатора.

Естественно, нужны дальнейшие более детальные исследования расходимости излучения.

Литература

1. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: 1979.

2. Борисов В. П., Великанов С. Д., Волков В. А. и др. Импульсный HF(DF)-лазер с дифракционной расходимостью излучения // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 6. С. 1208–1213.

3. Великанов С. Д., Газизова Э. А., Зарецкий Н. А., Федоркин О. О., Щуров В. В. Исследование спектрально-временного распределения энергии генерации электроразрядного HF/DF-лазера // Сборник докладов VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО». 2017. С. 499–508.

ИЗМЕРЕНИЕ И МОНИТОРИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ИМПУЛЬСНОГО ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

М. А. Демиденко

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

Введение

В отделении экспериментальной физики РФЯЦ ВНИИТФ эксплуатируются три исследовательских ядерных реактора (ИЯР): ядерный гомогенный урановый апериодический реактор ЯГУАР, быстрый апериодический самогасящийся реактор БАРС-5, импульсный гомогенный реактор испытательного комплекса ИГРИК-2. Реактор ИГРИК-2 должен заменить реактор ИГРИК [1]. В настоящее время он находится на стадии физического пуска, для осуществления которого было необходимо провести измерения и расчеты основных характеристик работы реактора. Одним из основных параметров, характеризующих работу ИЯР, является число делений (или энерговыделение) в активной зоне (АЗ) реактора. Целью данной работы является определение энерговыделения и коэффициентов связи между его значением и показаниями нейтронно-активационных детекторов-мониторов.

В зависимости от конструкции АЗ ректора измерение энерговыделения производится разными методами. Так, для реакторов из металлического высокообогащенного урана типа БАРС, метод определения полного числа делений основан на измерении распределения чисел делений по всему доступному объему АЗ и последующему интегрированию.

Для ИЯР с АЗ растворного типа, таких как ИГРИК и ЯГУАР, метод основан на измерении чисел делений в пробах топливного раствора АЗ, взятых после первого пуска реактора, с последующим пересчетом числа делений на весь объем топливного раствора.

Для определения энерговыделения в АЗ ИЯР при последующей их эксплуатации используют нейтронно-активационные детекторы-мониторы (ДНА), установленные в различные места (опорные точки) на АЗ или около нее. Активность ДНА определяют одновременно с энерговыделением в АЗ, по результатам данных обоих измерений рассчитывают коэффициенты связи между ними [2].

Одновременно с экспериментом проводят расчет Монте-Карло полного числа делений в АЗ и определение активации ДНА. В результате чего сопоставляются экспериментально и теоретически полученные данные. В данной работе энерговы деление измеряли по второму методу. В результате проведенного эксперимента были рассчитаны коэффициенты связи между энерговы делением и показаниями ДНА, которые устанавливали в опорных точках нейтронного поля реактора. Рассчитанные коэффициенты будут использоваться для обработки данных при последующих пусках реактора, что составляет значимую практическую ценность данной работы.

Описание реактора

ИГРИК-2 – растворный реактор самогасящегося действия, который может работать в импульсном и статическом режимах (рис. 1). В настоящее время на реакторе ИГРИК-2 достигнута максимальная стационарная мощность 40 кВт. Реактор предназначен генерировать импульсы делений длительностью не менее 2,2 мс с полным энерговыделением до 130 МДж. Реактор предполагается использовать в качестве мощного лабораторного источника нейтронного и гамма-излучения для физических исследований и испытаний различного рода материалов, образцов специального назначения и радиоэлектронной аппаратуры.

Реактор ИГРИК-2 был спроектирован для замены реактора ИГРИК, экплуатировавшегося в течение 30 лет. Корпус реактора ИГРИК-2 представляет собой полую емкость цилиндрической формы со сложной внутренней конфигурацией (рис. 2). Трехслойные стенки корпуса АЗ расчитаны на высокое давление. Снаружи корпус закрыт биологической защитой из свинца толщиной 67 мм и защитным кожухом из стали толшиной 5 мм. В зашите имеются два окна для выхода излучения. По сравнению с предшественником, ИГРИК-2 имеет сквозную внутреннюю полость с увеличенным диаметом: 390 мм против 310 мм. Для реализации большего энерговы деления увеличен объем топливного раствора до 140 л по сравнению с 50 л ИГРИК. Топливом реактора является раствор уранилсульфата (UO₂SO₄) в обычной легкой воде, с добавкой гомогенно введенного поглотителя – соли CdSO₄. Этот раствор ранее был использован на реакторах ИГРИК и ЭЛИР [1].



Рис.1. Общий вид корпуса АЗ реактора ИГРИК-2



Рис. 2. Разрез корпуса АЗ реактора ИГРИК-2

Метод измерений

Метод определения энерговыделения в А3 реактора ИГРИК-2 основан на измерении чисел делений в пробах топливного раствора А3, полученных после зачетного пуска реактора, с последующим пересчетом на весь объем топливного раствора [2]. Реализация метода происходила по следующим этапам: – для определения фонового содержания осколков делений (далее радиоактивных продуктов делений (РПД)) в растворе АЗ взяты пробы топливного раствора перед пуском реактора;

 произведен пуск реактора в статическом режиме, энерговыделение зарегистрировано ДНА из никеля;

 через несколько суток после пуска реактора, когда радиоактивность топливного раствора спала до безопасного значения, взяты пробы активированного раствора;

 в химической лаборатории из взятых проб раствора изготовлены фоновые и зачетные счетные образцы;

 проведен гамма-спектрометрический анализ счетных и фоновых образцов, определена активность наиболее информативных РПД;

 на основании полученных данных рассчитано полное число делений в АЗ, реализованное при пуске реактора;

 на основе измеренной активности ДНА и полученного значения энерговыделения в АЗ реактора определены коэффициенты связи.

Измерения активности РПД

Счетные образцы фоновой и зачетной проб были получены через 23 дня после пуска реактора. Измерения их активности проведено на полупроводниковом детекторе (ППД) из особо чистого германия. ПДД входит в состав гамма-спектрометрического комплекса. Для достижения наибольшей точности определения активности счетных образцов проведены их многократные измерения с разной геометрией между образцом и ППД. На основе этих измерений выбраны наиболее информативные РПД для дальнейшего расчета числа делений.

Наиболее точные данные были получены только по шести РПД (см. табл. 1). Время, прошедшее после пуска реактора, и высокая активность цезия-137 (вклад в суммарную активность более 95 %) не позволили использовать короткоживущие радионуклиды и радионуклиды с энергиями фотонов меньше 662 кэВ. У радионуклидов йода (¹³¹I и ¹³²I) активность была достаточно высока для измерения их содержания в счетных образцах, но полученное число делений по ним было ниже, чем у других РПД примерно в полтора раза. Обосновать это можно тем, что при изготовлении счетных образцов (выпаривание раствора) произошла частичная утечка радионуклидов. Перечень РПД в зачетных пробах, принятых для расчета энерговы деления приведен в табл. 1.

Зачетная проба						Фоновая проба	a		
РПД	Т _{1/2} , сут	Еү, кэВ	А*, Бк/л	Δ, %	РПД	Т _{1/2} , сут	Еү, кэВ	А*, Бк/л	Δ, %
⁹⁵ Zr	64,02	756,7;724,2	6,61 10 ⁸	4,3	¹³⁷ Cs	10990	661,6	3,52 10 ⁸	4,0
⁹⁵ Nb	34,97	765,8	$1,1610^9$	4,3	¹⁴⁴ Ce	284,6	293,3	$2,7610^5$	4,0
¹⁰³ Ru	39,27	497,1	5,26 10 ⁸	4,5	⁹⁵ Zr	64,0	756,7; 24,2	1,6 10 ⁵	6,0
¹³² Te	3,26	228,2	$1,3110^{10}$	5,7	⁹⁵ Nb	34,97	765,8	$2,510^5$	4,3
¹⁴⁰ Ba	12,75	537,3	3,1910 ⁹	4,4	⁶⁰ Co	1925,2	1332,5	$3,04\ 10^5$	4,0
¹⁴⁰ La	1,678	1597; 815,8; 487; 328,8	2,39 10 ¹⁰	4,6					

Радионуклиды в топливном растворе ИГРИК-2

*) – активность на 08.08.2017

Перейдем к анализу активности фоновых образцов. Т.к. в реакторе ИГРИК-2 использован топливный раствор реакторов ИГРИК и ЭЛИР, то были идентифицированы долгоживущие радионуклиды ¹³⁷Сs и ¹⁴⁴Се, накопленные за время эксплуатации раствора. Зарегистрированные РПД ⁹⁵Zr и ⁹⁵Nb были образованы ранее при калибровочных пусках на малой мощности реактора ИГРИК-2. Радионуклид ⁶⁰Со образовался в результате активации примесей в делящемся растворе при эксплуатации реактора ИГРИК.

Результаты расчета для зачетной и фоновой пробы представлены в табл. 1. Оценки погрешностей измерений сделаны согласно рекомендациям [3].

Результаты измерения энерговыделения

При расчете энерговыделения учли, что объем делящегося топливного раствора, находившийся в АЗ в зачетном пуске, был равен 111 л из 136 л общего объема раствора в баллоне хранения. После завершения пуска реактора активированный раствор был слит в баллон хранения и перемешан с не активированной частью раствора. Поэтому в расчеты энерговыделения введен поправочный коэффициент на разбавление топливного раствора равный 1,23. Также был учтен вклад долгоживущих фоновых РПД: ⁹⁵Zr и ⁹⁵Nb. Оценочное значение суммарного энерговыделения в калибровочных пусках реактора равно 9,4 10¹⁵ делений (0,28 МДж).

Расчет энерговыделения в зачетном пуске реактора ИГРИК-2 выполнен на основе измеренной удельной активности шести РПД.

Полное число делений в АЗ реактора при измерении удельной активности отдельного РПД [2]:

$$Wi = \frac{A_i}{\lambda i K_{\rm PIII}^i} V, \tag{1}$$

где $K_{\rm P\Pi Д}^{i}$ — кумулятивный выход i-го РПД. Погрешности кумулятивных выходов РПД взяты из работы [4] и составляют 2...4 % (1 σ). Границы погрешности оценки энерговыделения определяются по рекомендациям [3].

Результаты определения энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 представлены в табл. 2. Число делений в АЗ реактора определено, как средневзвешенное значение показаний шести РПД. Энерговыделение приведено в единицах МДж. Соотношение между числом делений и этими единицами принято 10¹⁷ делений = 2,9±0,16 МДж.

Таблица 2

Результаты определения энерговыделения в зачетном пуске реактора

№	Радионуклид	<i>Wi</i> , делений	$\Delta W, \% (P_{\rm g} = 0.95)$			
1	⁹⁵ Zr	$7,47 \cdot 10^{16}$	10,1			
2	⁹⁵ Nb	$7,16 \cdot 10^{16}$	10,1			
3	¹⁰³ Ru	$7,06 \cdot 10^{16}$	10,2			
4	¹³² Te	$7,26 \cdot 10^{16}$	10,9			
5	^{140}Ba	$7,78 \cdot 10^{16}$	10,2			
6	¹⁴⁰ La	$7,66 \cdot 10^{16}$	10,2			
$W = (7,57\pm0,78) \cdot 10^{16}$ делений 2,20±0,23 МДж, $P_{\rm g} = 0,95$						

Калибровка детекторов-мониторов энерговыделения

На основе полученных данных определены коэффициенты связи между показаниями нейтронноактивационных детекторов-мониторов и энерговыделением. ДНА из никеля были установлены в следующих опорных точках: штатной позиции мониторирования энерговыделения (М1) и в дополнительных точках поля излучения (М2 и М3):

M1 – 78,6 см от поверхности корпуса реактора на перилах его ограждения;

M2 – центр нижней половины бокового окна (расстояние от основания корпуса – 65 см);

М3 – центр канала АЗ в максимуме распределения флюенса нейтронов (расстояние от основания корпуса – 65 см).

Активность детекторов-мониторов измерена на эталонной гамма-спектрометрической установке ИКЭ-II-2. Статистическая погрешность измерений менее 1 %, полная погрешность 4 % при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 3 Коэффициенты связи между энерговыделением в АЗ реактора ИГРИК-2 и показаниями ДНА

Коэффициенты связи	K _{M1}	K _{M2}	K _{M3}	$\delta Kw, \%$ $(P = 0,95)$
<i>Кw</i> , МДж/(реакций/ядро)	$3,94 \cdot 10^{14}$	$1,70 \cdot 10^{13}$	$2,65 \cdot 10^{12}$	10,7
<i>Кw</i> , делений/(реакций/ядро)	1,36·10 ³¹	$5,87 \cdot 10^{29}$	9,15·10 ²⁸	12,2

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные значения чисел реакций

Реакция. Точка измерения (расчета)	Эксперимент	Расчет	Эксперимент /Расчет
⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co – место установки детекторов-мониторов (<i>R</i> = 125 см),	$(7,39\pm0,41)\cdot10^{-32}$ $\sigma = 5,5\%$	$(7,21\pm0,19)\cdot10^{-32}$ $\sigma = 2,6 \%$	1,025
⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co – центр канала АЗ	$(1,11\pm0,02)\cdot10^{-29}$ $\sigma = 2,0\%$	$(1,15\pm0,01)\cdot10^{-29}$ $\sigma = 1,0\%$	0,965
⁶³ Cu(n,γ) ⁶⁴ Cu – центр канала АЗ	$(1,35\pm0,03)\cdot10^{-28}$ $\sigma = 2,5\%$	$(1,39\pm0,02)\cdot10^{-28}$ $\sigma = 1,6\%$	0,971

Показания детекторов-мониторов Q_{Ni} связаны с энерговы делением W через коэффициент связи K_W [2]:

$$W = K_W Q_{Ni}.$$
 (2)

Коэффициент связи для М1 (см. табл. 3) основного штатного места размещения детектора-монитора практически не зависит от уровня раствора в пределах 100...136 л.. Значения коэффициентов для дополнительных мест установки М2 и М3 верны только для объема делящегося раствора, равного 111±3 л (изменяется положение максимума распределения числа делений в А3).

Одновременно с экспериментальным определением энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 были выполнены численные расчеты Монте-Карло ряда нейтронно-физических характеристик поля излучения данного реактора. В них входило распределение числа реакций ДНА из никеля и меди в канале и у поверхности корпуса АЗ, а также число реакций детекторов-мониторов энерговыделения. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 4. Числа реакций отнормированы на одно деление в АЗ. Оценка границ совпадения этих данных – менее 3 %.

Заключение

В результате проведенного эксперимента определено значение энерговыделения в активной зоне реактора ИГРИК-2 равное (7,57±0,78)·10¹⁶ делений или 2,20±0,23 МДж. Вместе с ним определены коэффициенты связи между показаниями детекторовмониторов из никеля и энерговыделением. В ходе работы были учтены и обоснованы особенности активации раствора АЗ. На основе выбранной технологии определения энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2, разработана, аттестована и вы пущена методика измерения и мониторирования энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 нейтронно-активационным методом. На ее основании можно определять значения энерговыделения от $1\cdot10^{16}$ до $5\cdot10^{18}$ делений (от 0,3 Дж до 150 МДж) с погрешностью ±11 % при доверительной вероятности 0,95.

Литература

1. Лавренюк Б. Н., Сукневич В. В., Порубов С. Г. Вывод из эксплуатации реакторов «ЭБР-Л», «ИГРИК», «ЯГУАР» // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. П. С. 71.

2. Литвин В. И. Определение энерговы деления в активных зонах ИЯР // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. І. С. 395.

3. ГОСТ Р 8.736 – 2011 Государственная система обеспечения единства измерений Измерения прямые многократные. М: Стандартинформ, 2013.

4. Meek M. E., Rieder B. F. Compilation of Fission product yields / Vallections Nuclear Center. NEDO-12154, 1974.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ ИНДИЯ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5»

<u>И. П. Елин</u>, Н. В. Жидков, Н. А. Суслов, Г. В. Тачаев

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

Введение

Одним из важнейших параметров, характеризующих проведенный эксперимент по исследованию работы термоядерных мишеней по проблеме инерциального термоядерного синтеза (ИТС) на лазерных установках, является нейтронный выход. Развитие методик его измерения – важная задача для исследования. Особенно актуально это сейчас, когда на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ создается лазерная установка нового поколения, которая потребует целый спектр различных методик по измерению нейтронного выхода.

В настоящее время на установке «Искра-5» [1] применяются следующие методики регистрации нейтронного выхода: метод затянутой регистрации; метод прямой активации меди 14 МэВ нейтронами; метод активации индия тепловыми нейтронами, основанный на реакции ¹¹⁵In(n, β , γ)¹¹⁶Sn, регистрирующий замедленные нейтроны; времяпролетная методика регистрации нейтронов сцинтилляционными датчиками.

Так как на установке проводилась серия экспериментов с мишенями с обратной короной (MOK) [2, 3] где требуется регистрация ДД-нейтронов, разрабатывалась и применялась методика прямой активации индия ДД-нейтронами 115 In(n,n') 115m In. Значительное преимущество методов прямой активации различных материалов заключается в том, что при известном сечении активации и геометрических характеристиках облучаемого образца не требуется проводить калибровку метода на системах генерации нейтронов, а достаточно откалибровать аппаратуру регистрации вторичных излучений активированного образца, что относительно просто делается с помощью промышленно выпускаемых эталонных источников излучений.

Методика прямой активации успешно применяется на установке NIF в Ливерморе в составе комплексов DIM-NAD и SNOUT-NAD для определения нейтронного выхода как в экспериментах с ДД-топливом, так и в экспериментах с ДТ-топливом [4].

Основная цель описанной здесь работы – подготовка, проведение экспериментов по отработке и использованию этой методики на установке «Искра-5» в опытах с мишенями типа МОК, а также обработка результатов. Необходимо было оценить возможности методики, ее чувствительность и саму возможность ее применения на установке, после чего разработать конкретный вариант ее применения и откалибровать получаемую систему регистрации. После проведения эксперимента следовало обработать результаты и сделать выводы о точности и перспективах применения методики, как на существующих, так и на строящейся лазерных термоядерных установках.

Описание методики измерения и ее применение на установке

В данной работе разрабатывалась и применялась методика активации индия по реакции ¹¹⁵In(n, n')^{115m}In в экспериментах с мишенями МОК на установке Искра-5. В реакции синтеза дейтериевой плазмы в мишени образуется моноэнергетический поток нейтронов с энергией 2,45 МэВ.

В ходе реакции неупругого рассеяния с их участием 115 In(n, n') 115m In в индии образуется изомер с периодом полураспада $T_{1/2} = 4.49$ ч. Распад изомера до 115 In сопровождается испусканием гамма квантов с энергией 336 кэВ и ветвлением распада 45,8 % [5, 6].

Суть методики заключается в следующем: образец индия подставляется под поток нейтронов, после эксперимента измеряется его наведенная активность на гамма-спектрометре по регистрации гамма-квантов с энергией 336 кэВ, а затем вычисляется нейтронный выход из мишени.

В ходе расчетов возможно выделить так называемый калибровочный фактор – величину, учитывающую все необходимые фундаментальные поправки. Необходимая калибровка с целью определения данного фактора может быть произведена с использованием образцовых спектрометрических гамма-источников.

Заранее очевидно, что для достижения максимальной чувствительности методики необходимо подвести образец как можно ближе к мишени, при этом максимально увеличив площадь его облучения. Эти параметры в совокупности ограничены необходимостью не создавать помех для иного применяемого на камере оборудования, а также не перекрывать лазерные пучки, идущие в мишень. Кроме того, близкое расположение позволяет избежать рассеяния нейтронов на материалах камеры по пути к образцу индия.

Методика применялась в двух различных сериях экспериментов с мишенями МОК. Из них первая серия двенадцатиканальных опытов на основной камере с ожидаемым выходом нейтронов порядка 1–3·10⁸ н/имп и вторая серия двухканальных опытов на малой камере с ожидаемым выходом $1{-}5{\cdot}10^7\,{\rm h}/{\rm им\,n}.$

После облучения индий помещался в германиевый полупроводниковый гамма-детектор для измерения наведенной активности по площади пика соответствующей гамма-линии. Измерения проводились с периодом 1 час в течение 12 часов, после чего возможно определить нейтронный выход мишени.

Оценка ожидаемых результатов в измерении нейтронного выхода

Концентрация атомов 115 изотопа индия в образце:

$$n = \frac{\rho N_a \in A}{A_W} = 0,0365 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{cm}^3},$$
 (1)

где $\rho = 7,31$ г/см³ – плотность индия; $N_a = 6,02 \times \times 10^{23}$ 1/моль – число Авогадро; $\epsilon_A = 0,9572$ – содержание ¹¹⁵ In в природном индии; $A_W = 115$ – атомная масса.

Поток нейтронов на единицу площади:

$$\varphi = \frac{Y}{(t_0 4\pi d^2)},\tag{2}$$

где d — расстояние между источником и образцом; Y — выход нейтронов; t_0 — время облучения. Активность:

$$A = n\sigma(E)\varphi \in_B \left(1 - e^{-\lambda t_0}\right) V e^{-\lambda t} =$$
$$= \frac{MN_a \in_A \lambda t_0 \sigma(E)\varphi \in_B e^{-\lambda t_0}}{A_W}, \qquad (3)$$

где ϵ_B – ветвление распада; M – масса образца в граммах.

Так как время облучения мало $\left(1-e^{-\lambda t_0}\right) = \lambda t_0.$

Скорость счета на детекторе:

$$V_{\text{счета}} = A \in_D \in_S, \tag{4}$$

где ϵ_D – эффективность детектора, ϵ_S – самопоглощение в образце.

Количество зафиксированных отсчетов на 336 кэВ от In115m:

$$(C - B) = \int_{t_1}^{t_2} v_{\text{cuera}} dt =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \epsilon_D \epsilon_S \frac{MN_a \epsilon_A \lambda t_0 \sigma(E) \varphi \epsilon_B e^{-\lambda t_0}}{A_W} dt =$$

$$= \frac{\epsilon_D \epsilon_S MN_a \epsilon_A \lambda t_0 \sigma(E) \varphi \epsilon_B \left(e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t_1} \right)}{\lambda A_W} =$$

$$= \frac{\epsilon_D \epsilon_S MN_a \epsilon_A \sigma(E) Y \epsilon_B \left(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2} \right)}{4\pi d^2 A_W}, \quad (5)$$

где *С* – площадь пика с фоном, *В* – площадь фона.

Калибровочный фактор в экспериментальных величинах:

$$F = \frac{(C-B)t_0 4\pi d^2 \lambda}{YM\Big[\Big(1-e^{-\lambda t_0}\Big)\Big(e^{-\lambda t_1}-e^{-\lambda t_2}\Big)\Big]} = \frac{(C-B)4\pi d^2}{YM\Big(e^{-\lambda t_1}-e^{-\lambda t_2}\Big)}.$$
(6)

Калибровочный фактор в теоретических величинах:

$$F = \frac{\epsilon_A \epsilon_D \epsilon_S \epsilon_B \sigma(E) N_a}{A_W}.$$
 (7)

Конечная формула для нейтронного выхода:

$$Y = \frac{(C-B)}{a_{\varphi} \in_D \in_S n\sigma(E) \in_B V\left(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}\right)}.$$
 (8)

Погрешность:

$$\Delta Y = \frac{\Delta(C-B)}{a_{\varphi} \in_D \in_S n\sigma(E) \in_B V \left(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}\right)}.$$
 (9)

D

Экспериментально определяемая активность (11):

$$(C-B) = \int_{t_1}^{t_2} v_{\text{cyera}} dt = \in_D \in_S \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = \in_D \in_S A_{\text{cp}}(t_2 - t_1);$$
(10)

$$A_{\rm cp} = \frac{C - B}{\epsilon_S \epsilon_D (t_2 - t_1)}.$$
 (11)

Погрешность:

$$\Delta A_{\rm cp} = \frac{\Delta (C - B)}{\epsilon_S \epsilon_D (t_2 - t_1)}.$$
 (12)

Коэффициент самопоглощения находился по приближенной формуле для ближней геометрии цилиндра [7]:

$$\epsilon_S = 1/CF(AT); \tag{13}$$

$$CF(AT) = \frac{-\ln\left(T^k\right)}{\left(1 - T^k\right)},\tag{14}$$

где k – коэффициент приближения, в данном случае k = 0, 8.

$$T = e^{-\mu_l x} = e^{-\mu_m \rho x},$$
 (15)

где µ_m — массовый коэффициент пропускания; р — плотность вещества; *х* — линейное расстояние, про-ходимое гамма-квантами.

Эффективность спектрометра зависит от спектра излучения образца и взаимной геометрии его и детектора. Наиболее распространенным способом определения эффективности детектора является экспериментальная калибровка с использованием калиброванных источников.

Калибровка гамма-спектрометра

Следующим этапом работы стали измерения эффективности детектора с использованием калиброванного источника гамма-квантов. Характеристики источника приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица 2

Характеристики калиброванного источника гамма-квантов для проведения калибровки спектрометра

Основной радионуклид	Барий-133
Активность радионуклида в источнике, согласно паспорту на 01 ноября 2007 го- да, кБк	48,99
Погрешность, % (P = 0,95)	2
Период полураспада, суток	3862
Активность радионуклида в источнике на текущее время, кБк	27,8±0,6

Барий был выбран в связи с тем, что у него имеется линия на энергии E = 356 кэВ, что весьма близко к энергии линии индия, измеряемой в экспериментах (E = 336 кэВ). Были проведены одиночные измерения на расстояниях 0, 5 и 10 см от детектора, каждое в течение 30 минут живого времени.

Результаты измерений

Расстояние от детектора до образца <i>I</i> , см	Эффективность детектора, согласно статье [4], є _D	Эффективность детектора по результатам измерений, є _D
0	0,091	$0,093{\pm}0,002$
5	0,012	$0,0146{\pm}0,0008$
10	0,0048	$0,0052{\pm}0,0002$

Как видно из табл. 2, в самом важном для нас случае расстояния до детектора 0 см, эффективность совпадает в пределах погрешности. Погрешность можно объяснить различием в организации экспериментов и неучтенных факторах, не описывающихся в статье. При дальнейших расчетах используются значения эффективности детектора, полученные в ходе экспериментальной калибровки.

Подготовка и проведение 12-канальных опытов

Первой запланированной серией экспериментов, в которой предполагалось применения методики, являлась серия 12-канальных опытов на основной камере установки Искра-5 с мишенями типа МОК. Основным вопросом по организации установки образца на подходящее расстояние являлся выбор крепления.

Крепление представляло собой специальную штангу, ранее использовавшуюся для размещения трековых детекторов в непосредственной близости от мишени. Капсула для детектора была адаптирована под индиевый образец.

Конструкция штанги позволяет изъять капсулу с образцом из пространства камеры сразу после эксперимента, не дожидаясь напуска воздуха в пространство камеры. Это позволяет сократить время простоя перед началом измерения гамма-активности образца с 2-3 часов до 10 минут, что является значимой величиной, учитывая период полураспада ^{115m}In, равный 4,49 ч. Крепление позволило установить образец достаточно близко к мишени, на расстояние $d = 3.5 \pm 0.1$ см от нее. Из минусов крепления стоит назвать малый размер капсулы, в которую устанавливался образец индия, что ограничивает его эффективную площадь и объем. Для избегания деформации и плавления материала рассеянным излучением, загрязнения продуктами реакции, индий покрыт алюминиевой фольгой толщиной 105 микрон.

Основные данные по образцу для первой серии экспериментов представлены в табл. 3.

Таблица 3

T	r					~
	I D D D M D T D I I	II VO	ngiata	NHOTI	11/11	ODDODIE
		ила	Dakie		1	UUUasua
_						

Наименование параметра	Значение параметра
Объем, <i>V</i> , см ³	$1,16\pm0,10$
Форма	Цилиндр
Эффективная площадь, $S_{\text{пов,}} \mathrm{cm}^2$	$0,79{\pm}0,06$
Расстояние до мишени, <i>R</i> , см	3,5±0,1
Масса, М, г	8,5±0,7
Содержание ¹¹⁵ In	0,9572

Всего было проведено 6 полноценных измерений, результаты которых представлены в табл. 4. Здесь In 1 – методика измерения нейтронного выхода, основанная на реакции ¹¹⁵In(n, β , γ)¹¹⁶Sn; M3P – метод затянутой регистрации; ВПМ – времяпролетная методика регистрации нейтронов сцинтилляционными датчиками; In 2 – исследуемая методика.

Таблица 4

№ опыта	E _{sum} , Дж	In 1*	M3P*	ВПМ*	In 2
1	1700	$(2,7\pm0,3)\times10^8$	$(2,1\pm0,5)\times10^8$	$(3,0\pm0,6)\times10^8$	$(1,7\pm0,6)\times10^8$
2	1650	$(1,1\pm0,6)\times10^7$	$(3,0\pm1,3)\times10^7$	$(5,0\pm3,6)\times10^7$	$(4\pm 4) \times 10^7$
3	2400	$(1,5\pm0,2)\times10^8$	$(0,9\pm0,3)\times10^8$	$(1,1\pm0,2)\times10^{8}$	$(1,0\pm0,4)\times10^8$
4	2000	$(1,0\pm0,2)\times10^8$	$(1,8\pm0,5)\times10^8$	$(1,0\pm0,2)\times10^8$	$(7\pm4) \times 10^{7}$
5	1900	$(3,1\pm0,8)\times10^7$	$(3,0\pm1,3)\times10^7$	$(3,5\pm1,1)\times10^7$	$(4\pm 4) \times 10^7$
6	2200	$(7,5\pm1,3)\times10^7$	$(8,2\pm2,6)\times10^7$	$(7,3\pm1,4) \times 10^7$	$(4\pm 4) \times 10^7$
* – приведе	нные для сравне	ния диагностики оп	исаны в [8]		

Нейтронный выход в 12-канальных опытах

График падения активности для опыта 1 представлен на рис. 1.



Рис. 1. Активность изомера в индиевом образце после эксперимента № 1

Постоянная распада для кривой аппроксимации, построенной по экспериментальным точкам, составляет $\lambda_{annp.} = (5, 1\pm 1, 5) \times 10^{-5}$, а для изомера ^{115m}In $\lambda_{изом. In} =$ = $4,3 \times 10^{-5}$ [5]. Таким образом, падение активности образца, облученного в эксперименте, соответствует по скорости распаду изомера ^{115m}In.

Минимальная измеряемая активность на установке [9]:

$$A_{\min} = \frac{1 + 2\delta\sqrt{n_{\Phi}T}}{\delta^2 \in S \in D}, \qquad (16)$$

где $T = t_{\phi} + t$ – общее время измерения; $n_{\phi} = B/3600$ – скорость счета фона; δ – задаваемая относительная погрешность измерения (0,5).

Найдя активность для всех периодов измерений, можно, сопоставив, определить минимальный измеримый выход нейтронов в применяемой для 12-канальных опытов геометрии $Y = 1,4 \times 10^8$ н/имп.

Два опыта не дали измеримого нейтронного выхода, из остальных шести лишь в двух выход нейтронов превысил порог минимально измеримого с учетом погрешностей.

Подготовка и проведение 2-канальных опытов

Для применения методики в двухканальных опытах на малой камере была полностью переработана геометрия образца с целью увеличения площади облучения, так как ожидаемые потоки нейтронов составляли порядка 10⁷ н/имп. Образец представлял собой цилиндр диаметром 5 см и толщиной 1 см, который размещался на расстоянии 1–1,5 см от мишени. Основные характеристики образца перечислены в табл. 5.

Таблица 5

Нейтронный выход в 2-канальных опытах

Наименование параметра	Значение параметра			
Объем, <i>V</i> , см ³	20,6±1,7			
Форма	Цилиндр			
Эффективная площадь, $S_{\text{пов,}}$ см 2	19,6±1,6			
Расстояние до мишени, <i>R</i> , см	(1-1,5)±0,1			
Масса, М, г	151±12			
Содержание ¹¹⁵ Іп	0,9572			

Для новой геометрии потребовалась коррекция формул.

Нейтронный выход:

$$Y = \frac{(C-B)}{a_{\varphi} \in_D \in_S n\sigma(E) \in_B V\left(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}\right)}, \quad (17)$$

$$a\varphi = \frac{R(R-l)}{2R^2\pi r^2},\tag{18}$$

где r — радиус образца; l — расстояние от источника до образца; R — расстояние от источника до края образца.

Активность:

$$A = n\sigma(E)a_{0}Y \in_{B} \lambda V e^{-\lambda t}$$
(19)

Результаты применения методики в двухканальных опытах приведены в табл. 6.

Погрешности приведены в рамках 1 .

Значительное повышение точности результата демонстрирует нам широкую вариативность диапазона применения методики, имеющую в основном геометрические ограничения. Пример графика активности образца для опыта 9 приведен на рис. 2.

Параметры и характеристики образца для двухканальных опытов

№ опыта	E _{sum} , Дж	In 1*	M3P*	ВПМ*	In 2	δ(In 2)	
1	450	$(4,0\pm0,9)\times10^7$	$(3,9\pm1,6)\times10^{7}$	$(3,9\pm1,2)\times10^{7}$	(9±2)×10 ⁶	0,22	
2	650	$(2,0\pm0,7)\times10^7$	$(1,5\pm1,2)\times10^{7}$	_	$(7,8\pm1,2)\times10^{6}$	0,15	
3	800	$(6,3\pm1,1)\times10^{7}$	$(2,8\pm1,2)\times10^{7}$	$(5,0\pm1,3)\times10^{7}$	$(2,5\pm0,4)\times10^{7}$	0,16	
4	400	$(2,0\pm0,6)\times10^7$	(5±3)×10 ⁶	$(2,4\pm0,8)\times10^{7}$	(5,0±1,3)*10 ⁶	0,26	
5	1000	$(1,0\pm0,2)\times10^{8}$	$(6,0\pm0,8) \times 10^7$	$(7,0\pm1,5)\times10^7$	$(6,6\pm0,6)*10^7$	0,09	
* – приведенные для сравнения диагностики описаны в [8]							



Рис. 2. Активность изомера в индиевом образце после эксперимента № 9

Минимальный измеримый выход нейтронов в применяемой для 2-канальных опытов геометрии $Y = 3 \times 10^6$ н/имп.

Заключение

Предлагаемая методика нахождения нейтронного выхода имеет значительные перспективы по применению, как на существующих установках ИТС, так и на потенциально более мощных. Проведенная работа по разработке и применению методики дала следующие итоги.

1. Исследование вопросов применения методики в условиях малого выхода нейтронов показало, что необходимо принять все меры для достижения достаточной чувствительности. Необходима разработка специального крепления, либо иной способ быстрого извлечения образца из камеры установки. В случае выхода нейтронов более 10¹² нейтронов на импульс индиевый образец может быть установлен снаружи камеры, что значительно упрощает доступ и работу с ним. Варианты с креплением в колодце внутри камеры и снаружи камеры применены на установке NIF в рамках комплексов измерительных приборов WELL-NAD, DIM-NAD, SNOUT-NAD.

2. Проведенные оценки показали, что в имеющихся условиях чувствительность методики составляет порядка 10^8 нейтронов на импульс с относительной погрешностью около 0,5. Расчет показывает, что выход нейтронов больше 10^9 может быть измерен с относительной погрешностью не более 0,15.

3. Вариативность способов установки и размеров образца позволяет использовать методику для боль-

шого спектра показателей нейтронного выхода, в том числе и на мощных установках нового поколения. Имеется возможность использовать другие материалы для измерения нейтронного выхода от ДТ-плазмы.

4. Калибровка методики сводится к калибровке аппаратуры регистрации вторичных излучений активированного образца с помощью промышленно выпускаемых эталонных источников излучений. Это исключает необходимость использования калиброванного источника нейтронов.

5. Чувствительность к энергетическому спектру нейтронов позволяет исследовать параметры сжатой плазмы и, в частности, колебания параметра сжатия топлива $\langle \rho R \rangle$ в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу при использовании активационных индикаторов из различных материалов.

6. Методика позволяет восстановить пространственное распределение потока нейтронов после эксперимента за счет установки активируемых образцов в различных точках в камере и вне нее.

Литература

1. Анненков В. И., Багрецов В. А., Безуглов В. Г. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра-5» // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 5. С. 536–537. 2. Бессараб А. В., Долголева Г. В., Зарецкий А. И. и др. Исследование термоядерной лазерной плазмы в мишенях с обращенной короной // Доклады АН СССР. 1985. Т. 282. С. 857–861.

3. Результаты первых экспериментов с термоядерными мишенями на мощной лазерной установке «Искра-5» // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1992. Т. 102. № 6(12).

4. Bleuel D. L., Yeamans C. B., Bernstein L. A. et al. Neutron activation diagnostics at the National Ignition Facility // Rev. Sci. Instrum. 2012. 83. 10D313.

5. Маслов И. А., Лукницкий В. А. Справочник по нейтронному активационному анализу. Ленинград: Наука, 1971.

6. Cooper G. W., Ruiz C. L. NIF total neutron yield diagnostic // Rev. Sci. Instrum. 2001. Vol. 72. P. 814.

7. Райли Д., Энсслин Н., Смит Х., мл. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. М.: Наука, 2007

8. Абзаев Ф. М., Бессараб А. В., Кириллов Г. А. Методы и аппаратура для диагностики плазмы на установке «Искра-5» // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 4. С. 68–73.

9. Дементьев В. А.. Измерение малых активностей радиоактивных препаратов. М: Атомиздат, 1967.

УЧЕТ ФОРМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЧАСТОТЫ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

<u>А. Е. Здарьев</u>, С. А. Лазарев

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

Интегральные схемы (ИС), расположенные на борту космического аппарата (КА), подвергаются воздействию ионизирующего излучения космического пространства: тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), электронов, протонов. Результатом этого воздействия может являться неправильное функционирования схем или их полная потеря работоспособности.

Наиболее распространенным эффектом, возникающим при прохождении ТЗЧ через ИС, являются одиночные сбои (ОС), точная оценка частоты которых является на сегодня актуальной проблемой, поскольку при заниженной оценке числа сбоев возможно некорректное функционирование аппаратуры, а в случае завышенной – возникает необходимость разрабатывать и применять радиационно-стойкую ИС, которая является дорогостоящей.

С уменьшением проектных норм ИС появилась необходимость рассматривать множественные сбои. Они возникают в случае, когда один ион проходит через несколько чувствительных областей, расположенных поблизости, либо, если сбор заряда неравновесных носителей происходит сразу в нескольких таких областях. Учет многократных сбоев необходим для оценки корректного функционирования радиоэлектронной аппаратуры.

Различные устройства КА окружены защитой, которая, как правило, представляет собой алюминиевый корпус определенной геометрии. Из-за наличия такого корпуса вокруг ИС наблюдается анизотропия поля ионов солнечных космических лучей и галактических космических лучей в чувствительной области (ЧО), что также может повлиять на прогноз частоты сбоев.

Существуют несколько моделей ЧО для проведения расчета ожидаемого числа ОС. Среди них имеются: модель эффективного потока, тонкой области, интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель) [1]. В настоящее время эта модель применяется наиболее широко, и оценка частоты сбоев v в ней сводится к вычислению интеграла [2, стр. 101]:

$$\nu = \frac{mS_0}{4} \int_0^{S_{\text{max}}} \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} f(s) w(E, s) \varphi(L) dL ds, \qquad (1)$$

где S_0 – полная площадь поверхности ЧО (прямоугольного параллелепипеда); S_{\max} – максимальное значение длины хорды в ЧО; L – ЛПЭ иона в кристалле кремния; L_{max} – максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; L_{min} – минимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; $\varphi(L)$ – дифференциальный ЛПЭ-спектр ТЗЧ; f(s) – дифференциальное распределение длин пробегов ТЗЧ (распределение хорд) в чувствительной области; m – количество чувствительных областей в ИС; v – количество ОС в ИС в единицу времени; w(L,s) – относительное распределение Вейбулла. Оно имеет вид:

$$w(E,s) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E - E_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right), \qquad (2)$$

где α , β – параметры; E – энергия, оставленная ТЗЧ в ЧО. Она вычисляется из выражения: $E = \rho sL$, где ρ – плотность кремния; E_0 – пороговое значение энергии ЧО.

IRPP-модель имеет свои недостатки. Во-первых, необходимый для расчета частоты ОС параметр (глубина ЧО) не оценивают, а задают на основе данных о технологии изготовления, что приводит, на наш взгляд, к неопределенности результата. Во-вторых, в данной модели постулируется изотропность потока ТЗЧ в ЧО. В-третьих, для согласования с экспериментальными результатами в рамках IRPP-модели вводится функция чувствительности ИС. Для устранения предположения о необходимости ввода данной функции при оценке числа сбоев выбрана модель ЧО, форма которой основана на экспериментальной зависимости сечения сбоя от ЛПЭ ТЗЧ [3]. В дальнейшем она будет называться моделью ЧО произвольной формы (ЧОПФ). В ней используются те же допущения, что и в интегральной модели прямоугольного параллелепипеда. Расчет частоты одиночных сбоев в ИС при изотропном потоке ионов в данной модели проводился по формуле:

$$v = \frac{mS_0}{4} \int_{0}^{S_{\text{max}}} \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} f(s) H(E,s) \varphi(L) dL ds.$$
(3)

Здесь H(E,s) – ступенчатая функция чувствительности ИС (принимает значение 1, если энергия, поглощенная в ЧО превышает пороговую; 0 в остальных случаях).

Для задания формы ЧО использовались выражения (4) и (5) [3] и распределение (6):

$$\sigma = \pi r^2, \tag{4}$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{k}{h},\tag{5}$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{E - E_0}{\beta}\right)^{\alpha} \right) \right], \tag{6}$$

где σ – сечение OC; σ_0 – сечение насыщения OC; k- глубина ЧО; r и h - координаты точки на поверхности ЧОПФ (радиус и ордината соответственно),

На основе (4), (5), (6) получим:

$$r = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{E_0}{\beta} \left(\frac{k}{h} - 1\right)\right)^{\alpha} \right) \right].$$
(7)

Из формулы (7) видно, что ЧО представляет собой аксиально симметричную фигуру, так как радиус r зависит только от ординаты h.

Для оценки влияния поперечных сторон ЧО на частоту ОС в IRPP-модели проведен ее расчет для разных соотношений размеров прямоугольного параллелепипеда при фиксированном значении сечения насыщения и одинаковых значениях параметров относительного распределения (6). В работе использовались следующие значения параметров IRPP-модели:

- сечение насыщения: 9 мкм²;

- глубина ЧО (высота прямоугольного параллелепипеда) варьировалась от 0,1 до 2 мкм с шагом 0,1 мкм.

 – безразмерный коэффициент α принимал значения: 0.5, 3, 10, 20;

– коэффициент β: 1 МэВ, 3 МэВ;

– пороговое значение энергии Е₀ изменялось от 5 до 25 МэВ с шагом 5 МэВ.

Дифференциальные ЛПЭ-спектры ионов ГКЛ, полученные с использованием программы OMERE [4] для разных толщин защитного корпуса, приведены на рис. 1.





Сравнение полученных результатов частоты сбоев проводилось по формуле:

$$\delta = \frac{\left(\nu_2 - \gamma \nu_1\right)}{\nu_2}.$$
 (8)

Здесь δ – разница в оценке числа ОС; v₂ – частота ОС, рассчитанная по IRPP-модели при поперечных размерах ЧО: a = 2 мкм и b = 4,5 мкм; $v_1 - частота$ ОС, рассчитанная по IRPP-модели при поперечных размерах ЧО: a = b = 3 мкм; γ – безразмерный коэффициент (оценивался по методу наименьших квадратов). Его значение указано на рис. 2 и равно 0,9535. Для идеального случая ($\gamma = 1$) значение частоты v_1 всегда равно v_2 , и тогда $\delta = 0$.



Толщина алюминиевой защиты: 0,1 г/см²

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, показывают, что оценки частоты ОС в ИС могут отличаться в два раза при изменении соотношений сторон. Такая разница наблюдается при достаточно редких событиях (частота $OC \le 10^{-2}$ день⁻¹). При частых событиях (частота $OC \ge 10^{-2}$ день⁻¹) результаты приблизительно совпадают (разница в оценке не превышает 30 %).

Если пороговое значение ЛПЭ больше 30 МэВ·см²/мг (высокое пороговое ЛПЭ), то модели [5] прогнозируют частоту ОС, отличающуюся на несколько порядков. Для оценки частоты ОС при больших пороговых ЛПЭ в ИС выбраны следующие значения параметров ЧО:

сечение насыщения: 9 мкм²;

- поперечные размеры прямоугольного параллелепипеда: 3×3 мкм²;

- высота ячейки варьировалась от 0,1 до 2 мкм с шагом 0,1 мкм;

-безразмерный коэффициент α принимал значения: 0,5, 1, 3, 5, 10, 15, 20.

– коэффициент β: 1 МэВ, 3 МэВ.

- пороговая энергия Е₀ изменялась от 5 до 25 МэВ с шагом 5 МэВ;

Результаты расчета частоты ОС для этого случая приведены на диаграмме рассеяния на рис. 3. Они показывают, что расхождение частоты ОС может достигать одного порядка (частота $OC \le 10^{-4} \text{ день}^{-1}$).



Рис. 3. Частота ОС в ИС при пороговом ЛПЭ \geq 30 МэВ·см²/мг. Толщина алюминиевой защиты: 0,1 г/см²

Если ИС окружена защитным корпусом, например, в виде прямоугольного параллелепипеда, то в чувствительных областях будет наблюдается анизотропия поля ТЗЧ. На рис. 4 представлена геометрия расчетов при использовании защитного корпуса. Также на нем приведены: угол падения α иона, радиус-векторы \vec{R} и \vec{r} , элемент поверхности сферы dS, а также вектор \vec{T} , вдоль которого движется ТЗЧ. Данный вектор может пересекать одну или несколько чувствительных объемов, поэтому в ИС могут наблюдаться сразу несколько сбоев от воздействия одного иона (множественные сбои).



Рис. 4. ИС, окруженная алюминиевым корпусом

На рис. 5 представлено схематичное расположение ЧО в ИС (вид сбоку), которая представляет собой кристалл кремния высотой H = 0,03 см и поперечными размерами W: 1×1 см². Горизонтальные размеры области, в которой находится один чувствительный объем, одинаковы и равны l = 4,88 мкм, а ее высота принимала значения k = 1, 2, 5, 10 мкм. Предполагалось, что в каждой ячейке памяти содержится

только одна ЧО. Общее количество ячеек памяти в ИС составляло 2048×2048.



Рис. 5. Расположение чувствительных областей в ИС

Для оценки количества множественных сбоев использовались следующие характеристики алюминиевой защиты: поперечные размеры корпуса одинаковы и равны 1,6 см, высота 0,3 см, толщина 0,1 см. Параметры ЧО принимали значения: $\alpha = 0,3$, $\beta = 3$ МэВ, $E_0 = 2$ МэВ, $\sigma_0 = 9$ мкм². Результаты расчетов приведены на рис. 6.



Рис. 6. Кратные сбои в ИС при разных значениях глубины ЧО: 1 – 10 мкм, 2 – 5 мкм, 3 – 2 мкм, 4 – 1 мкм

Результаты расчетов показывают, что при облучении микросхемы тяжелыми заряженными частицами наблюдается заметное количество кратных сбоев (в особенности двойных и тройных) по сравнению с одиночными. Причем при увеличении глубины ЧО количество кратных сбоев возрастает. Пороговое значение ЛПЭ варьировалось в диапазоне от 1 до 10 МэВ·см²/мг.

Известно, что для оценки числа сбоев используется глубина ЧО, которая в рамках IRPP-модели обычно варьируется от нескольких долей до единиц микрометров. Данные, приведенные на рис. 7, говорят о возможности экспериментальной оценки глубины ЧО. Исходя из того, что зависимость отношения множественных сбоев к однократным от глубины ЧО близка к линейной, то каждому значению функции (отношение, например, двукратных сбоев к однократным) соответствует одно значение аргумента (глубина ЧО).



Рис. 7. Зависимость отношения кратных сбоев к многократным от глубины ЧО: 1 – отношение двукратных сбоев к однократным, 2 – отношение трехкратных сбоев к однократным, 3 – отношение четырехкратных сбоев к однократным

На основе представленных выше результатов численного моделирования проведен расчет многократных сбоев в ИС за алюминиевым корпусом толщиной 1 мм для формы ЧО, предложенной в статье [3]. Пороговое значение ЛПЭ L_0 составляло 3,88 МэВ·см²/мг; глубина k ЧО: 0,4, 1, 2, 4 мкм.

Результаты расчета числа событий с учетом их множественности приведены на рис. 8 и 9, на которых видно, что количество кратных сбоев попрежнему составляет заметную долю от их общего числа. В таблице приведены оценки частоты сбоев для двух типов защит: сферической оболочки и прямоугольного параллелепипеда.



Рис. 8. Кратные сбои в ИС при различных значениях глубины ЧОПФ



Рис. 9. Кратные сбои в ИС при различных значениях глубины ЧОПФ. Пороговое ЛПЭ = 3,88 МэВ·см²/мг

Частота сбоев в ИС для двух типов защит

Глубина ЧО,	Прямоугольный	Сферическая
МКМ	параллелепипед	оболочка
0,4	0,599854	63,3554
1	0,318125	12,5276
2	0,199352	1,97123
4	0,104544	0,309387

Из представленных в таблице данных следует, что с уменьшением глубины ЧО возрастает отличие между приведенными оценками частоты ОС. При значении глубины 0,4 мкм данное расхождение составляет приблизительно 2 порядка.

Из результатов проведенных расчетов частоты ОС сделаны следующие выводы:

 – оценка числа ОС является модельно зависимой, то есть она зависит от значений параметров модели при одной и той же экспериментальной зависимости сечения от ЛПЭ;

 – результаты расчета числа сбоев показывают, что доля кратных сбоев составляет заметную долю от общего числа событий, поэтому ее следует учитывать при оценке сбоеустойчивости ИС;

 – зависимость отношения кратных сбоев к однократным от глубины ЧО можно использовать для экспериментальной оценки глубины ЧО.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы // Радио и связь. 2004. С. 320.

2. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // НИЯУ МИФИ. 2010. С. 148.

3. Гаганов В. В., Грунин А. В., Дроздов И. Ю., Игнатов К.А., Киселев Ф.К., Крылевский Е. Н., Кудрявцев Ю. Г., Лазарев С. А., Музюкин К М., Силаев А. В., Цыганков Б. В., Петрикович Я. Я., Гусев В. В., Мироненко Л. П. Методические особенности обработки результатов испытаний микросхемы памяти на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц // Труды II российско-белорусской научно-технической конференции «элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева. 2015. С. 119–125. 4. www://trad.fr/ru/космос/по-omere/

5. Чумаков А. И., Согоян А. В., Смолин А. А. Прогнозирование частоты одиночных эффектов в диффузионном приближении // НИЯУ МИФИ. 2017.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДАЛЬНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

<u>Р. А. Зорин</u>, С. Д. Великанов, К. В. Воронцов, Н. Г. Захаров, В. Б. Коломеец, В. И. Лазаренко, А. С. Надежин, Н. И. Николаев, Г. Н. Номаконов, С. Н. Синьков, Ю. Н. Фролов

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

Когерентные источники дальнего ИК-диапазона, генерирующие излучение в спектральном окне прозрачности атмосферы от 8 до 12 мкм, обладают значительным потенциалом применения в задачах экологического мониторинга. К перспективной технологии создания подобных излучателей следует отнести параметрическое преобразование излучения твердотельных лазеров [1]. Указанный подход позволяет разрабатывать когерентные источники дальнего ИКдиапазона, которые, с одной стороны, выгодно отличаются от классических СО₂-лазеров по своим эксплуатационным характеристикам, а с другой – превосходят по мощности излучения современные квантово-каскадные лазеры.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по генерации когерентного излучения дальнего ИК-диапазона за счет преобразования излучения гольмиевого лазера в параметрическом генераторе света (ПГС). Представлены результаты экспериментов по генерации когерентного излучения дальнего ИК-диапазона за счет параметрического преобразования излучения гольмиевого лазера в нелинейном кристалле ZnGeP₂. Дифференциальная эффективность преобразования двухмикронного излучения гольмиевого лазера в дальний ИК диапазон достигала величины 20 % при оптическом КПД 8,5 %, что свидетельствует о значительной доле 35 % преобразованных квантов накачки. Длительность импульса параметрической генерации по полувысоте составила 21 нс.

Концепция построения экспериментального стенда, предназначенного для экспериментальных исследований преобразования излучения гольмиевого лазера в спектральный диапазон от 8 до 10 мкм, следует принципам, изложенным в работе [2]. Оптическая схема стенда представлена на рис. 1.

Излучение волоконного тулиевого лазера 1, после прохождения входного окна 2, фокусируется линзой 3 в кристалл Ho:YAG 5 через дихроичное зеркало 4. Резонатор гольмиевого лазера образован тремя зеркалами: дихроичным зеркалом 4, глухим зеркалом 6 и выходным сферическим зеркалом 10. В целях реализации импульсно-периодического режима работы лазерного источника применяется акустооптический модулятор 7. Спектральная селекция длин волн излучения гольмиевого лазера обеспечивается плоскопараллельной пластинкой 8. Излучение гольмиевого лазера фокусируется линзой 11 через входное зеркало 13 в нелинейно-оптический кристалл $ZnGeP_2$ 14. Резонатор ПГС состоит из трех зеркал: входного 13 и двух выходных плоских зеркал 15 и 16. С помощью поворотных зеркал 17 и 18 выходное излучения ПГС направляется через оптику выходного телескопа 20 на выходное окно 19.



Рис. 1. Оптическая схема экспериментального стенда: 1 – тулиевый лазер; 2 – входное окно; 3 – линза; 4 – зеркало дихроичное; 5 – кристалл Но:YAG; 6 – зеркало глухое; 7 – акустооптический модулятор; 8 – селектор; 9 – зеркало поворотное; 10 – зеркало выходное; 11 – линза; 12 – зеркало поворотное; 13 – зеркало входное ПГС; 14 – кристалл ПГС; 15 – зеркало глухое ПГС; 16 – зеркало выходное ПГС; 17 – зеркало поворотное; 18 – зеркало поворотное;

19 - оптика выходного телескопа; 20 - выходное окно

На рис. 2 представлена приведенная в относительных единицах зависимость мощности импульсно-периодической генерации гольмивого лазера от мощности непрерывной накачки, при частоте повторения импульсов 20 кГц.

На рис. 3. представлена осциллограмма импульса генерации гольмиевого лазера. Из рисунка видно, что длительность импульса гольмиевого лазера по полувысоте составляет ~ 33 нс.



Рис. 2. Зависимость мощности импульсно-периодической генерации гольмивого лазера от мощности накачки



Рис. 3. Осциллограмма импульса генерации гольмиевого лазера

Как следует из данных эксперимента, оптический КПД гольмиевого лазера достигает 71 % при дифференциальной эффективности ~78 %. Лазер с указанными характеристиками является не только уникальным гольмиевым излучателем в России, но и превосходит большинство зарубежных аналогов.

Излучение гольмиевого лазера используется для накачки ПГС с целью генерации импульсно периодического излучения с частотой 20 кГц в спектральном диапазоне от 8 до 10 мкм.

Спектр генерации выходного излучения ПГС представлен на рис. 4.



Рис. 4. Спектр параметрической генерации

Из рис. 4 видно, спектр параметрической генерации находится в спектральном диапазоне от 8 до 10 мкм.

Осциллограмма импульса генерации ПГС представлена на рис. 5. Из рис. 5 видно, что длительность импульса параметрической генерации по полувысоте составила ~21 нс.



Рис. 5. Осциллограмма импульса параметрической генерации

Приведенная в относительных единицах зависимость мощности импульсно-периодической генерации в спектральном диапазоне от 8 до 10 мкм от мощности накачки представлена на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость мощности генерации в спектральной области от 8 до 10 мкм от мощности накачки

Как следует из данных эксперимента, оптический КПД параметрической генерации в спектральной области от 8 до 10 мкм достиг величины 8,5 % при максимальной дифференциальной эффективности ~20 %.

Величина оптического КПД, чье низкое абсолютное значение обуславливается квантовым дефектом ($\lambda_{\rm H} = 2$ мкм / $\lambda_{\rm r} = 8$ мкм), свидетельствует о значительной доле ~35 % преобразованных квантов накачки.

Расходимость излучения в спектральном диапазоне от 8 до 10 мкм определялась путем измерения диаметра пучка в фокусе отражающего зеркала с металлическим покрытием. Расходимость излучения составила ~7 угл. мин. по уровню 0,5 энергии при диаметре выходной апертуры 12 мм.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по генерации когерентного излучения дальнего ИК-диапазона за счет параметрического преобразования излучения гольмиевого лазера в нелинейном кристалле ZnGeP₂. Оптический КПД параметрической генерации в спектральной области от 8 до 10 мкм достиг величины 8,5 % при максимальной дифференциальной эффективности ~20 %. Расходимость излучения составила ~7 угл. мин. по уровню 0,5 энергии при диаметре выходной апертуры 12 мм. Созданный в рамках данной работы полностью твердотельный лазерный источник дальнего ИК диапазона, обладающий указанными характеристиками, не имеет аналогов в России и сравним по параметрам с лучшими зарубежными образцами.

Литература

1. Lippert E., Fonnum H., Haakestad M. W. // Laser source with high pulse energy at $3-5 \ \mu m$ and $8-12 \ \mu m$ based on nonlinear conversion in ZnGeP₂ // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9251. P. 92510D-1.

2. Илькаев Р. А., Гаранин С. Г., Лазаренко В. И. и др. Параметрический генератор света среднего ИК-диапазона на основе кристалла ZnGeP₂ с накачкой лазерным пучком на длине волны 2,1 мкм // Proceeding of Mid-Infrared Coherent Sources, Barcelona, 2005. P.214–216.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЕЙ ТИПА БИМ

Д. А. Кидяйкин, А. Л. Макаров, Д. М. Гришин, А. А. Лебедев

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

Настоящая методика устанавливает порядок подготовки и проведения измерений выходных характеристик ускорителей типа БИМ (бетатрон импульсный малогабаритный).

Безжелезные бетатроны были предложены в пятидесятых годах прошлого века А. И. Павловским [1], как альтернатива ускорителям прямого действия, для решения задачи создания мощного импульсного источника тормозного излучения [2], предназначенного для рентгенографии быстропротекающих процессов [3].

В электромагните обычного бетатрона присутствует ферромагнитный сердечник, который обеспечивает концентрацию магнитного поля между полюсами электромагнита. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничивается процессом насыщения сердечника. Это приводит к нарушению условия стационарности орбиты. Для решения этой проблемы во ВНИИЭФ, под руководством А. И. Павловского, была разработана серия безжелезных бетатронов, которые выполняются без ферромагнитного сердечника. В них распределение электромагнитных полей формируется выбором определенной конфигурации системы токонесущих витков. Поэтому в безжелезных бетатронах энергия электронов в 2-3 раза больше, чем в обычных бетатронах с таким же радиусом орбиты. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничена лишь предельным током, который может быть пропущен в обмотке без ее разрушения.

Существуют и другие преимущества безжелезных бетатронов, например темп ускорения. В обычных бетатронах он ограничен вихревыми токами в сердечнике. В безжелезных бетатронах это ограничение снимается, и темп ускорения может достигать десятков кэВ за оборот.

Импульсные безжелезные бетатроны типа БИМ разработаны специально для использования в качестве источника излучения при рентгенографии быстропротекающих процессов во взрывных экспериментах. Реализуется такой источник ускорением электронов до энергии в 50–70 МэВ. Мощность источника I сильно зависит от энергии ускоренных электронов (E) $I \sim E^3$, и пропорциональна количеству ускоряемых частиц. Рентгенограмма получается регистрацией теневого изображения объекта, просвечиваемого направленным пучком излучения.

Основными критериями качества ускорителя типа БИМ являются выходные характеристики, определяющие экспозиционную дозу, длительность импульса излучения, а также размеры фокусного пятна излучателя. Относительная важность каждого из этих параметров определяется объектом исследования, скоростью процесса и требуемой точностью регистрации. Следует стремиться к получению максимальной интенсивности излучения при минимальной длительности импульса и минимальных размерах фокусного пятна (ФП).

Целью данной работы является разработка методики измерения выходных характеристик ускорителей типа БИМ.

Для достижения цели предлагаются следующие решения:

 разработка метода измерения экспозиционной дозы тормозного излучения ускорителя прибором ИКС-А;

 2) разработка метода измерения длительности импульсов излучения различных режимов работы ускорителя с помощью фотоэлектронного конвертера (ФЭК) и осциллографического регистратора;

 разработка метода измерения размеров источника излучения с помощью камеры-обскуры и системы регистрации изображений.

Методика измерения обеспечивает диапазон измерения экспозиционной дозы тормозного излучения ускорителя от 1 до 100 Р, диапазон измеряемой длительности от 50 до 500 нс и диапазон измерения размеров источника излучения ≤ 10 мм.

Метод измерения экспозиционной дозы излучения

Из-за большого расстояния, на котором достигается электронное равновесие для квантов излучения мегавольтного диапазона, экспериментальное определение экспозиционной дозы для них практически невозможно. Поэтому для определения экспозиционной дозы жесткого тормозного излучения, измеряют поглощенную дозу в веществе и производят расчет с учетом характеристик вещества и спектрального состава излучения. Приближенно экспозиционную дозу можно рассчитать с помощью соотношения:

$$\mathcal{A}_{\mathsf{JKCII}} = \mathcal{A}_{\gamma} \frac{\mu_{\mathsf{BO3}\mathcal{A}}}{\mu_{\mathsf{BeIII}}} \exp(\mu_{0\mathsf{BEIII}} \rho d), \qquad (1)$$

где $Д_{\gamma}$ – поглощенная доза, измеренная на глубине *d*; ρ – плотность вещества; $\mu_{воз}$, $\mu_{вещ}$ – массовые коэффициенты передачи энергии для воздуха и облучаемого вещества соответственно; $\mu_{0 \text{ вещ}}$ — массовый коэффициент ослабления для облучаемого вещества. Причем в качестве μ берутся их величины для средней по спектру излучения энергии.

Метод измерения дозы тормозного излучения основан на использовании явления термолюминесценции [4]. При облучении пластина ПСТ из алюмофосфатного стекла состава ИС-7 запасает поглощенную энергию. При нагревании ПСТ при температуре T = 370 °С запасенная энергия освобождается в виде свечения – термолюминесценции.

Измерение поглощенной дозы излучения (в дальнейшем просто дозы) проводится с помощью прибора ИКС-А [5], где в качестве датчиков используются алюмофосфатные стекла ИС-7 (диаметр 8 мм, толщина 1 мм).

Связь дозы с результатом, полученным при измерении облученного дозиметра на измерительных пультах ИКС-А, определяется соотношением:

$$\mathcal{A}_{\gamma} = f(\mathcal{A}\mathcal{K}_{\tau}), \tag{2}$$

где Д, дел. – показания измерительного пульта; K_{τ} – коэффициент, учитывающий зависимость результата наблюдения от интервала времени τ , прошедшего от момента облучения стекол.

Стекла при проведении рабочих измерений помещаются в однородную среду, в качестве которой используется алюминиевый блок – фантом, эскиз которого показан на рис. 1.



Рис. 1. Эскиз конструкции фантома: 1 – корпус, 2 – алюминиевые диски, 3 – отверстия для размещения датчиков ИС-7

Корпус фантома (1) представляет собой полый алюминиевый цилиндр диаметром $d_{\Phi} = 136$ мм, с толщиной стенок h = 8 мм, длиной a = 200 мм. В цилиндре размещаются скрепляемые между собой до полного соприкосновения алюминиевые диски (2) различной толщины диаметром $d_{\pi} = 119$ мм. В дисках выполнены отверстия, в которые помещаются датчики ИС-7.

Фантом помещается в однородное по сечению поле, на оси источника излучения. Расстояние от источника излучения до фантома составляет 2 м. Схема измерения дозы тормозного излучения представлена на рис. 2. Глубина фантома, на которой достигается электронное равновесие, зависит от спектрального состава излучения (энергии, до которой электроны ускоряются в бетатроне).



Рис. 2. Схема измерения дозы тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – тест-объект (фантом)

При исследовании зависимости дозы в фантоме от его глубины, объем цилиндра заполняется дисками с датчиками и, по положению максимума, определяется рабочая глубина. Показания датчиков расположенных на данной глубине принимаются за значения дозы, создаваемой тормозным излучением бетатрона на оси его распространения.

Метод измерения длительности импульсов излучения

При измерении длительности импульсов излучения используется сцинтилляционный конвертер, преобразующий у-излучение в свет. В данном измерении используется ФЭК, который позволяет преобразовывать световые вспышки, возникающие при прохождении ионизирующего излучения через сцинтилляционный конвертер, в электрический сигнал. Далее при помощи электронной аппаратуры регистрируются электрические импульсы. ФЭК обычно располагается в металлическом корпусе совместно с сцинтилляционным конвертером и хорошо защищен от электромагнитных наводок. В качестве сцинтилляционного конвертера излучения используется сцинтиллятор типа ПС (полистирол), длительность высвечивания которого мала по сравнению с длительностью импульса излучения, поэтому он является техническим средством, не влияющим на результат измерения.

ФЭК располагается в однородном поле на оси излучения на расстоянии 2,5 м от источника излучения. Длительность его импульсной характеристики мала по сравнению с длительностью сигнала, поэтому он также является техническим средством, не влияющим на результат измерения. Сигнал от ФЭК регистрируется цифровым осциллографом Tektronix TDS3034C с полосой пропускания не ниже 100 МГц. Схема измерения длительности импульсов тормозного излучения представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема измерения длительности импульсов тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – сцинтилляционный конвертер, 3 – фотоэлектронный конвертер (ФЭК)

Сцинтилляционный метод имеет ряд преимуществ перед другими методами. Прежде всего, это высокая эффективность для проникающих излучений (для гамма-излучения – десятки процентов). Далее малое время высвечивания сцинтилляторов порядка 10⁻¹⁰ сек. Это обеспечивает высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных детекторов. Другими словами, позволяет работать с короткими импульсами ионизационного излучения, которые обычно генерируются в ускорительных установках. Сцинтилляционные детекторы имеют чувствительность на несколько порядков выше, чем ионизационные камеры и газовые пропорциональные счетчики.

Метод измерения размеров источника излучения

Измерения размеров источника излучения выполняются при помощи камеры-обскуры и регистратора изображения.

Камера-обскура представляет собой свинцовый корпус, внутри которого находятся танталовые или вольфрамовые диски. Ее структура представлена на рис. 4. Каждый диск имеет в центре просверленное отверстие. Диаметр отверстий уменьшается к середине устройства. Для достижения необходимой точности измерений минимальный диаметр отверстия не должен превышать 0,5 мм. В данной методике камера-обскура устанавливается на оси излучения на расстоянии 1,25 м от источника излучения. Между ними устанавливается свинцовая пластина.



Рис. 4. Структура камеры-обскуры: 1 – свинцовый корпус, 2 – танталовые диски

В качестве регистратора используется регистрирующая кассета, структура которой показана на рис. 5. Она состоит из алюминиевого корпуса, двух танталовых пластин толщиной 1 мм и люминофорного экрана, расположенного между этими пластинами. Регистрирующая кассета размещается на расстоянии 2,5 м от источника излучения. На поверхности кассеты для контроля размеров изображения размещается шаблон, представляющий собой свинцовую пластину с размерами 10×20×20 мм.



Рис. 5. Структура регистрирующей кассеты

Схема измерения размеров источника тормозного излучения представлена на рис. 6.



Рис. 6. Схема измерения размеров источника тормозного излучения: 1 – источник излучения, 2 – свинцовая пластина, 3 – камера-обскура, 4 – шаблон для контроля размеров изображения, 5 – регистрирующая кассета с набором необходимых пластин

После облучения люминофорная пластина обрабатывается с помощью дигитайзера CR 30-Х, предназначенного для сканирования экспонированных рентгеновских кассет с сигнальной пластиной и формирования полутонового цифрового изображения. Посредством обработки цифрового изображения определяются горизонтальный и вертикальный размеры источника излучения.

Порядок выполнения измерений

 Порядок выполнения измерения экспозиционной дозы:

 воспроизведение импульса излучения на фантоме по команде с пульта;

- получение результатов с дозиметра ИКС-А;

- обработка полученных данных.

2. Порядок выполнения измерения длительности тормозного излучения:

- воспроизведение импульса излучения на ФЭК;

– передача данных с ФЭК на осциллограф;

- обработка полученных данных.

3. Порядок измерения размеров источника излучения:

 воспроизведение изображения камерыобскуры на регистрирующей кассете;

- считывание и оцифровка изображения на дигитайзере CR 30-X; подбор толщины свинцовой пластины таким образом, чтобы все изображение находилось в пределах линейной части диапазона чувствительности дигитайзера;

 повторно воспроизвести изображение камерыобскуры на регистрирующей кассете, оцифровать изображение на дигитайзере CR 30-X с учетом подобранной свинцовой пластины;

- обработка полученных данных.

Обработка результатов измерений

1. Обработку результатов измерений дозы тормозного излучения следует выполнять следующим образом:

– рассчитывается коэффициент K_{τ} . Если измерение проводится не более чем через 24 часа после облучения, то $K_{\tau} = 1$. Иначе (от 1 до 20 суток) K_t рассчитывается по формуле:

$$K_{\tau} = \tau^{0,03},$$
 (3)

где т (сутки) – время от момента облучения до момента измерения.

Находится среднее из 4 (или более) результатов измерения для детекторов, которые стояли в одной точке поля нагружения $\overline{\mu}$, дел:

$$\overline{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_{i}}{n},$$
(4)

где $Д_i$, дел – результат измерения *i* – ого детектора; *n* – число детекторов в данной точке поля наблюдения.

 – формула расчета дозы Д_γ (формула 1) для каждого диапазона пультов ИКС-А определяется при градуировке.

— определяется погрешность вычисления дозы тормозного излучения при доверительной вероятности P = 0.95 в зависимости от условий облучения дозиметров и количества дозиметров в точке поля источника ионизирующего излучения. Результаты измерений оформляются записью в журнале. При записи в журнале значение дозы должно фиксироваться с точностью до одного знака после запятой с указанием порядка.

- экспозиционная доза рассчитывается по формуле 1.

2. Обработку результатов измерения длительности и тормозного излучения следует выполнять следующим образом:

 осциллографом регистрируется импульс тормозного излучения.

– определяется амплитуда импульса тормозного излучения.

 – определяется длительность импульса на полувысоте. находится среднее из 4 (или более) результатов измерения длительности импульса на полувысоте.

 Обработку результатов измерения размеров источника излучения следует выполнять следующим образом:

 измерения размеров источника излучения осуществляются посредством считывания информации с люминофорных экранов с помощью дигитайзера CR 30-Х. Дигитайзер осуществляет считывание и оцифровку информации с люминофорных экранов с шагом 0,1 мм/пиксель. Он является основным компонентом системы оборудования, в которую кроме него входят рентгеновские кассеты со стираемыми люминофорными сигнальными пластинами и рабочая станция, на которой производится идентификация рентгеновских кассет, а также последующая обработка и отправка полученной в результате такой обработки цифровой информации. Дигитайзер CR 30-Х сопряжен с отдельной рабочей станцией, на которой установлено программное обеспечение, выполняющее идентификацию кассет и обработку изображений.

– для обработки информации, полученной при сканировании люминофорных экранов с помощью дигитайзера CR 30-Х, используется программный пакет для рабочей станции AGFA. Он представляет собой программную оболочку, устанавливаемую на персональный компьютер, в среде которой выполняется обработка цифровых изображений и используются специальные функции, обеспечивающие идентификацию, редактирование, печать и пересылку изображений.

 – учитывая геометрию схемы метода (рис. 6), коэффициент увеличения β рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{L_2}{L_1},\tag{5}$$

где L_1 — расстояние между источником излучения и камерой-обскурой, L_2 — расстояние между источни-ком излучения и регистрирующей кассетой.

 на основе полученных данных рассчитываются горизонтальные и вертикальные размеры источника излучения по следующим формулам:

$$r = \sqrt{R^2 - (\beta b)^2};$$

$$z = \sqrt{Z^2 - (\beta b)^2},$$
(6)

где *R*, *Z* – горизонтальный и вертикальный размеры изображения на полувысоте соответственно, *b* – диаметр отверстия камеры обскуры.

Погрешности результатов измерений

1. Основная погрешность измерения дозы не превышает $\pm \left(15 + \frac{100}{N}\right)$ % с доверительной вероятностью P = 0.95, где N – показания стрелочного прибора. Точность измерения составляет ± 25 %.

2. Основная погрешность измерения длительности импульса излучения указана без разделения ее на части (на систематическую и случайную). В технических характеристиках осциллографа Tektronix указано, что предел допускаемой абсолютной погрешности измерения длительности составляет:

$$\Delta_{\rm Ocu} = \pm (1, 5 \cdot 10^{-2} \cdot t). \tag{7}$$

Относительная погрешность измерения длительности излучения рассчитывается следующим образом:

$$\delta_{\text{Осц}} = \pm \frac{(1, 5 \cdot 10^{-2} \cdot t)}{t} = \pm 0,015.$$
 (8)

3. Схема метода определения погрешности измерения размеров источника излучения выглядит следующим образом. Для начала проводятся 10 измерений размеров изображения эталонного тест-объекта программным методом. В качестве такого тест-объекта используется свинцовая пластина с размерами 10×20×20 мм. Она размещается на поверхности регистрирующей кассеты. Затем полученные результаты сравниваются с реальными размерами свинцовой пластины. На основе данного сравнения была получена погрешность измерения $\Delta = \pm 0,2$ мм.

Литература

1. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Зысин Ю. А., Герасимов А. И. Сильноточные безжелезные бетатроны // ДАН СССР. 1965. Т. 160. № 1. С. 68.

2. Богданкевич О. В., Николаев Ф. А. Работа с пучком тормозного излучения. – М.: Атомиздат, 1964.

3. Анисович К. В., Вайнберг Э. И., Кантер Б. М. и др. Рентгенотехника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. РЗ9 В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1980. Кн.2. С. 383.

4. Павловский А. И., Модель Б. И., Савченко В. А. и др. Применение стекол ИС-7 термолюминесцентного метода дозиметрии ИКС для исследований полей мощных фотонных излучений с энергиями (10⁻² – 50) МэВ. Отчет о НИР / ВНИИЭФ, 1988.

5. Иванов В. И. Курс дозиметрии. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ОБРАТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

<u>И. Н. Китаев,</u> А. Е. Дубинов

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

Рассматривается особенности распространения ионно-звуковых и пыле-звуковых волн (DAW) в плазме с движущимися ионным и пылевым потоками соответственно. В результате анализа дисперсионных соотношений показано, что ионно-звуковые волны и DAW при определенных условиях могут существовать в форме обратных волн с антипараллельными групповой и фазовой скоростями. Найдены диапазоны скоростей ионного и пылевого потоков для реализации обратных ионно-звуковых волн и DAW. Получено и проанализировано дисперсионное уравнение для ионно-звуковых волн в двумерной постановке задачи. Найдены границы области на плоскости $\{k_x, k_y\}$, в которой существуют обратные волны (OB).

Введение

ОВ называются волны, у которых фазовая и групповая скорости антипараллельны: $v_{ph} \uparrow \downarrow v_{gr}$, или, в обобщенном смысле, – волны, у которых угол между направлениями скоростей v_{ph} и v_{gr} тупой. Значение ОВ в фундаментальной и прикладной физике уже сейчас достаточно велико [1], и количество примеров их успешного применения растет. Например, на возбуждении и усилении ОВ основан принцип действия СВЧ-лампы обратной волны (ЛОВ) – карсинотрона [2, 3]. Кроме того, можно назвать еще несколько примеров устройств с ОВ – плоские суперлинзы [4–7] и маскирующие оболочки [8, 9].

В работе [4] была поставлена задача поиска материалов, в которых могли бы распространяться электромагнитные OB. В природе до сих пор не нашлось сред или материалов, в которых бы они могли распространяться. Решение задачи создания таких сред пришло с созданием новых технологий метаматериалов [10–12], которые представляют собой композиты, состоящие из периодического множества одинаковых или иногда неодинаковых проволочных элементов – метаатомов. В [13] утверждается, что среды, о которых известно, что в них могут распространяться акустические или оптические OB с тупым углом между направлениями скоростей v_{ph} и v_{gr} , – только искусственные.

В [4] затрагивался также вопрос о существовании ОВ в плазме. И действительно, плазма обладает большим числом волновых степеней свободы. Поэтому найти OB среди плазменных волн оказалось несложно. Например, известно, что ионные и электронные бернштейновские моды в замагниченной плазме [14–18] имеют в своем спектре диапазоны длин волн, на которых волна имеет отрицательную v_{gr} при положительной v_{ph} . Однако, возможность существования OB для других типов плазменных волн в литературе до сих пор не рассматривалась.

В данной работе на примере ионно-звуковых волн и DAW показывается, что обычные электростатические волны при определенных условиях могут распространяться в незамагниченной плазме в форме OB. Излагаемая здесь идея возможности ионнозвуковой и пыле-акустической OB в плазме основана на специально подобранном направленном течении соответствующей фракции плазмы.

Обратная ионно-звуковая волна (одномерный случай)

Получим дисперсионное соотношение для ионно-звуковых волн в плазме в одномерной постановке задачи. Будем для краткости называть направлением «вперед» направление вдоль оси Ox, а направлением «назад» – против оси Ox.

Рассмотрим электрон-ионную бесстолкновительную незамагниченную квазинейтральную плазму, в которой ионы двигаются в одном направлении с одинаковой скоростью упорядоченного движения v_{0i} . Электроны будем считать безынерционными и распределенными по Больцману:

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{k_B T_e}\right),\tag{1}$$

где n_e — концентрация электронов, n_0 — невозмущенная концентрация электронов и ионов, T_e — их температура, ϕ — электростатический потенциал, e — элементарный заряд, k_B — постоя ная Больцмана.

Такая модель плазмы может описывать, например, солнечный ветер [19], т. е. фактически быть природной средой. Другим примером плазмы, к которой применима данная модель, можно считать плазму с набегающим на приэлектродный слой ионным потоком в соответствии с критерием Бома [18, 20–23].

Будем исходить из следующих уравнений ионной динамики

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial (n_i v_i)}{\partial x} = 0; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x} = -\frac{e}{m_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{1}{m_i n_i} \frac{\partial p_i}{\partial x}; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 4\pi e \left(n_e - n_i \right), \tag{4}$$

где n_i – концентрация ионов, v_i – их скорость, p_i – их газодинамическое давление, m_i – масса отдельного иона и считается, что ионы однократно заряжены.

Положим, что ионная фракция плазмы подчиняется уравнению состояния $p_i = n_i k_B T_i$, причем температура ионного газа $T_i = \text{const.}$ Придадим плазме малое волновое возмущение:

$$n_i = n_0 + \tilde{n}_i \exp\left[i\left(kx - \omega t\right)\right]; \tag{5}$$

$$v_i = v_{0i} + \tilde{v}_i \exp\left[i\left(kx - \omega t\right)\right]; \tag{6}$$

$$\varphi = \tilde{\varphi} \exp\left[i\left(kx - \omega t\right)\right]. \tag{7}$$

Такая запись возмущений означает, что фазовая скорость волны направлена вперед при положительных значениях ω и k.

Подставим (5)–(7) в уравнения (2)–(4). После линеаризации и несложных алгебраических вычислений получим дисперсионное соотношение в канонической форме записи

$$1 = \frac{\omega_{pi}^{2}}{\left(\omega - k v_{0i}\right)^{2} - \omega_{pi}^{2} \lambda_{Di}^{2} k^{2}} - \frac{1}{k^{2} \lambda_{De}^{2}},$$
 (8)

или в форме, разрешенной относительно частоты ω,

$$\omega(k) = \omega_{pi} \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + \lambda_{De}^{-2}}} + \lambda_{Di}^2 k^2 + k v_{0i}.$$
 (9)

В (8), (9) и далее используются обозначения

$$\omega_{pi}^2 = \frac{4\pi e^2 n_0}{m_i}, \quad \lambda_{De,i}^2 = \frac{k_B T_{e,i}}{4\pi e^2 n_0}.$$
 (10)

Для плазмы с неподвижными ионами, т. е. при $v_{0i} = 0$, уравнения (8) и (9) принимают вид дисперсионного соотношения для ионного звука, известный из классических учебников по физике плазмы, а график зависимости $\omega(k)$ (кривая 1 на рис. 1а и 1б) будет симметричен относительно вертикальной оси.

Обе ветви этого графика имеют по три характерных для ионно-звуковых волн участка [24, 25]: длинноволновый участок с линейным ионным звуком со ионно-звуковой скоростью

$$V_s = \frac{d\omega}{dk}\Big|_{k=\pm 0} = \pm \omega_{pi} \sqrt{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2}, \qquad (11)$$



Рис. 1. Дисперсионные кривые ионно-звуковых волн: а – при $V_1 > v_{0i} > V_2$; б – при $v_{0i} > V_2$, 1 – для плазмы с неподвижными ионами; 2 – для плазмы с ионным потоком. Дугообразные стрелки показывают направления поворота кривых, врезки показывают изменение линейных ионно-звуковых скоростей при повороте

далее следует средневолновой участок с меньшим наклоном, соответствующий ионно-плазменным колебаниям, и коротковолновый «тепловой участок» с сильным затуханием по механизму Ландау. Симметричное расположение ветвей и знак ± в (11) означает одинаковый характер распространении волны вперед и назад.

Если же теперь положить $v_{0i} \neq 0$ (для определенности мы приняли, что упорядоченное движение ионов направлено назад, т. е. $v_{0i} < 0$), то кривая 1 повернется относительно начала координат по часовой стрелке на угол, тангенс которого равен v_{0i} , и займет место кривой 2 (рис. 1а и 16). При этом симметрия графика относительно вертикальной оси теряется, а значения линейных ионно-звуковых скоростей становятся разными для направлений вперед и назад:

$$V_s = \frac{d\omega}{dk}\Big|_{k=\pm 0} = \pm \omega_{pi} \sqrt{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2} + v_{0i}.$$
 (12)

Для значений скорости упорядоченного движения из диапазона $V_1 > v_{0i} > V_2$ с границами

$$V_{1} = 4\omega_{pi}\lambda_{Di}\sqrt{\frac{\theta(\theta\sqrt{4\theta+3}+2\theta+1)}{(\sqrt{4\theta+3}+2\theta)^{3}}}, \text{ где } \theta = \frac{\lambda_{Di}}{\lambda_{De}}, (13)$$
и $V_{2} = \omega_{pi}\lambda_{Di},$ (14)

угол поворота будет таков, что на правой ветви дисперсионной кривой 2, которая соответствует движению волны вперед, появится спадающий участок (рис. 1а). На этом участке групповая скорость направлена назад. Наличие такого участка свидетельствует о том, что на нем реализуется OB.

Для еще бо́льших значений скорости v_{0i} , когда выполняется $v_{0i} > V_2$, угол поворота будет достаточным для пересечения правой ветвью кривой 2 горизонтальной оси (рис. 1б). Это соответствует тому, что для длинноволнового участка, на котором частота положительна, реализуется ОВ, а для коротковолнового участка, где частота отрицательна, реализуется прямая волна с сонаправленными назад скоростями v_{ph} и v_{gr} .

Значения граничных скоростей V_1 и V_2 находятся достаточно просто: V_1 есть минимальный тангенс угла наклона касательной к кривой 1, на рис. 1 V_2 есть тангенс угла наклона коротковолновой асимптоты кривой 1.

Таким образом, при некоторых значениях скорости упорядоченного движения v_{0i} может быть реализована ионно-звуковая OB.

Обратная ионно-звуковая волна (двухмерный случай)

Рассмотрим безграничную бесстолкновительную незамагниченную плазму. Будем считать, что плазма содержит распределенные по Больцману электроны:

$$n_e = n_{0e} \exp\left(\frac{e\varphi}{k_B T_{0e}}\right),\tag{15}$$

а также ионы, однонаправлено движущиеся вдоль оси 0x со скоростью \mathbf{v}_{0i} . Несмотря на отсутствие магнитного поля рассматриваемая плазма является анизотропной. Поэтому для нее необходимо, по меньше мере, двумерное рассмотрение.

Запишем векторные уравнения, описывающие движение ионной фракции плазмы

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \left(n_i \mathbf{v}_i \right) = 0; \tag{16}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + (\mathbf{v}_i \nabla) \mathbf{v}_i = -\frac{e}{m_i} \nabla \varphi - \frac{1}{m_i n_i} \nabla p_i; \qquad (17)$$

$$\Delta \varphi = 4 \pi e \left(n_e - n_i \right). \tag{18}$$

В (15)–(18) введены следующие обозначения: $n_{e,i}$ – концентрации электронов и ионов, $T_{0e,0i}$ – температуры электронов и ионов, $\mathbf{v}_i = \{v_{ix}; v_{iy}\}$ – вектор скорости ионов, p_i – газодинамическое давление ионной фракции, m_i – масса иона, e – элементарный заряд, φ – электростатический потенциал, k_R – постоянная Больцмана.

Предположим, что ионная фракция подчиняется уравнению состояния

$$p_i = n_i k_B T_{0i}. \tag{19}$$

Придадим плазме малое волновое возмущение с волновым вектором $\mathbf{k} = \{k_x; k_v\}$ (рис. 2):



Рис. 2. Направления векторов в задаче

$$n_i = n_{0i} + \tilde{n}_i \exp\left[I\left(\mathbf{kr} - \omega t\right)\right]; \qquad (20)$$

$$\mathbf{v}_{i} = \mathbf{v}_{0i} + \tilde{\mathbf{v}}_{i} \exp\left[I\left(\mathbf{kr} - \omega t\right)\right]; \qquad (21)$$

$$\varphi = \tilde{\varphi} \exp I \left(\mathbf{kr} - \omega t \right), \tag{22}$$

где *I* – мнимая единица. После подстановки (20)–(22) в (16)–(20) и стандартной процедуры линеаризации получим дисперсионное уравнение

$$\frac{\omega_{pi}^2}{\left(\omega - kv_{0i}\right)^2} = \frac{k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}}{\left(k_x^2 + k_y^2\right) \left[1 + \lambda_{Di}^2 \left(k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}\right)\right]}, \quad (23)$$

которое можно разрешить относительно частоты ω

$$\omega(k_x, k_y) = \omega_{pi} \sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}}} + \lambda_{Di}^2 (k_x^2 + k_y^2) + v_{0i} k_x.$$
(24)

В полученном дисперсионном уравнении были использованы следующие обозначения:

$$\lambda_{De,i}^2 = \frac{k_B T_{0e,0i}}{4\pi e^2 n_{0e,0i}} \text{ и } \omega_{Di}^2 = \frac{4\pi e^2 n_{0i}}{m_i}.$$

Уравнения (23) и (24) задают в декартовых координатах $\{k_x, k_y, \omega\}$ дис персионную поверхность. При $v_{0i} = 0$ она имеет вид поверхности вращения вокруг оси 0ω (рис. 3).

При $v_{0i} \neq 0$ дисперсионная поверхность не имеет осевой симметрии и наклонена в сторону против направленного движения ионов. Например, если $v_{0i} < 0$ поверхность наклонена в положительном направлении оси $0k_x$ (рис. 4).



Рис. 3. Дисперсионная поверхность ионно-звуковых волн дли изотропной плазмы при $T_i/T_e = 0, 25, v_{0i} = 0$

При достаточном угле наклона на поверхности возникает локальная впадина, в окрестности которой ионно-звуковая волна может принимать форму OB.

Найдем границы области на плоскости $\{k_x, k_y\}$, в которой угол между фазовой и групповой скоростью ионного звука тупой.

Известны общие выражения для этих скоростей [27, 28]:

$$\mathbf{v}_{ph} = \frac{\omega}{\mathbf{k}} \mathbf{w}_{gr} = \frac{d\omega}{d\mathbf{k}} = \operatorname{grad}_{\mathbf{k}} \omega.$$
 (25)



Рис. 4. Дисперсионная поверхность ионно-звуковых волн дли плазмы с однонаправлено движущимися ионами при $T_i/T_e = 0, 25, v_{0i} = 0, 95\omega_{pi}\lambda_{Di}$

Угол ψ между векторами \mathbf{v}_{ph} и \mathbf{v}_{gr} , называемый углом сноса, можно найти из векторного произведения следующим образом:

$$\cos \psi = \frac{\left(\mathbf{v}_{ph} \mathbf{v}_{gr}\right)}{v_{ph} v_{gr}},\tag{26}$$

Причем, если $\cos\psi < 0$, то угол сноса ψ является тупым.

Приведем некоторые результаты вычислений. Выражение для фазовой скорости:

$$\mathbf{v}_{ph} = \frac{1}{k_x^2 + k_y^2} \left[\omega_{pi} \sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}}} + \lambda_{Di}^2 \left(k_x^2 + k_y^2 \right) + v_{0i} k_x \right] \left(k_x \mathbf{i} + k_y \mathbf{j} \right), \tag{27}$$

выражение для групповой скорости

$$\mathbf{v}_{gr} = \begin{cases} \frac{\omega_{pi} \left[\frac{k_x \lambda_{De}^{-2}}{\left(k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}\right)^2} + k_x \lambda_{Di}^2\right]}{\sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x^2 + k_y^2} + \lambda_{Di}^2} + \lambda_{Di}^2 \left(k_x^2 + k_y^2\right)}} + v_{0i} \end{cases} \mathbf{i} + \frac{\omega_{pi} \left[\frac{k_x \lambda_{De}^{-2}}{\left(k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}\right)^2} + k_x \lambda_{Di}^2\right]}{\sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x^2 + k_y^2 + \lambda_{De}^{-2}}} + \lambda_{Di}^2 \left(k_x^2 + k_y^2\right)}} \mathbf{j}, \tag{28}$$

где і и ј – единичные векторы в плоскости $\{k_x, k_y\}$.

Выражение для $\cos \psi$ является очень громоздким. Поэтому приведем только график линии $\cos \psi = 0$, рассчитанный для различных значений скорости v_{0i} (рис. 5).



Рис. 5. Границы областей, в которых ионно-звуковые волны являются ОВ при $T_i/T_e = 0,25: 1 -$ при $v_{0i} = 0,90\omega_{pi}\lambda_{Di},$ 2 – при $v_{0i} = 0,92\omega_{pi}\lambda_{Di},$ 3 – при $v_{0i} = 0,95\omega_{pi}\lambda_{Di},$ 4 (сепаратриса) – при $v_{0i} = 1,00\omega_{pi}\lambda_{Di} = V_2,$ 5 – при $v_{0i} = 1,10\omega_{pi}\lambda_{Di},$ 6 – при $v_{0i} = 1,20\omega_{pi}\lambda_{Di},$ 7 – при $v_{0i} = 1,30\omega_{pi}\lambda_{Di}$

Именно он является границей области в плоскости $\{k_x, k_y\}$, в которой угол ψ является тупым.

При различных значениях скорости v_{0i} граница может иметь различный вид. Так, при

$$v_{0i} < V_1 = 4\omega_{pi}\lambda_{Di}\sqrt{\frac{\theta\left(\theta\sqrt{4\theta+3}+2\theta+1\right)}{\left(\sqrt{4\theta+3}+2\theta\right)^3}},\qquad(29)$$

где $\theta = \frac{\lambda_{Di}}{\lambda_{De}}$, такой границы нет вообще,

при

$$V_1 < v_{0i} < V_2 = \omega_{pi} \lambda_{Di},$$
 (30)

граница существует, она замкнута и ограничивает конечную яйцеобразную область, приходящуюся на ионно-плазменные колебания, однако при $v_{0i} > V_2$ граница разомкнута, она ограничивает бесконечную область. Значения критические скоростей V_1 и V_2 ранее получены в [26]. Замкнутые и разомкнутые границы отделяются сепаратрисой (кривая 4 на рис. 5) при $v_{0i} = V_2$.

Обратная DAW

Пыле-акустические волны (DAWs) в плазме были предсказаны в [29]. Первые экспериментальные наблюдения DAWs были осуществлены в [30–32]. Впоследствии экспериментально измерялись дисперсионные соотношения DAWs [33–35], исследовались DAWs в условиях невесомости на международной космической станции [36, 37], наблюдалась дифракция DAW на преграде [38].

Нелинейная теория и эксперименты с DAWs описаны в многочисленных статьях [39–41]. Были теоретически и экспериментально изучены следующие формы DAWs: периодические DAWs [42], ударные DAWs [43, 44], DA-солитоны [45, 46], DAсуперсолитоны [47], DA годие waves [48, 49], цилиндрические и сферические DA-солитоны [50–52].

Недавно был представлен обзор исследований DAWs за 25-летний период после их открытия [53], в котором отмечено значение DAWs для фундаментальной физики плазмы, для понимания природных явлений в космосе, таких как планетарные кольца, мезосфера земли, хвосты комет, и в прикладных исследованиях, например, агломерации твердых микрочастиц в процессах плазменных технологий. Укажем, что направленное течение заряженной пыли сквозь плазму очень часто возникает в различных экспериментах [54].

Теперь выведем дисперсионное соотношение для DAWs в одномерной постановке задачи. Будем для краткости называть направлением «вперед» направление вдоль оси 0x, а направлением «назад» против оси 0x. Рассмотрим бесстолкновительную незамагниченную квазинейтральную запыленную плазму, в которой частицы пыли двигаются в одном направлении с одинаковой скоростью упорядоченного движения v_{0d} . Электроны и ионы будем считать безы нерционными и распределенными по Больцману:

$$n_{e,i} = n_{0e,i} \exp\left(\pm \frac{e\varphi}{k_B T_{e,i}}\right),\tag{31}$$

где $n_{e,i}$ – концентрации электронов и ионов, $n_{0e,i}$ – невозмущенные концентрации электронов и ионов, $T_{e,i}$ – их температуры, φ – электростатический потенциал, e – элементарный заряд, k_B – постоянная Больцмана, знак + используется для электронов.

Будем исходить из следующих уравнений динамики:

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \frac{\partial (n_d v_d)}{\partial z} = 0; \tag{32}$$

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial z} = \frac{q_d}{m_d} \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{1}{m_d n_d} \frac{\partial p_d}{\partial z}; \qquad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 4\pi e(n_e - n_i + q_d n_d), \qquad (34)$$

в которых обозначено: q_d – средний электрический заряд пылинок; m_d – их масса; v_d , n_d , p_d – переменные скорость, концентрация и газодинамическое давление пылевой фракции плазмы.

Положим, что пылевая фракция плазмы подчиняется уравнению состояния $p_d = n_d k_B T_d$, причем будем считать, что температура пыли T_d = const. Придадим плазме волновое возмущение:

$$n_d = n_{0d} + \hat{n}_d \exp\left[i\left(kz - \omega t\right)\right]; \qquad (35)$$

$$v_d = v_{0d} + \hat{v}_d \exp\left[i\left(kz - \omega t\right)\right]; \quad (36)$$

$$\varphi = \widehat{\varphi} \exp\left[i\left(kz - \omega t\right)\right] \tag{37}$$

с малыми амплитудами. Такая запись возмущения означает, что фазовая скорость волны направлена вперед при положительных значениях ω и k.

Подставим (35)–(37) в уравнения (32)–(34). После линеаризации и несложных алгебраических вычислений получим дисперсионное соотношение в канонической форме записи

$$1 = -\frac{1}{k^2 \lambda_{De}^2} - \frac{1}{k^2 \lambda_{Di}^2} + \frac{\omega_{pd}^2}{\left(\omega - k v_{0d}\right)^2 - \omega_{pd}^2 \lambda_{Dd}^2 k^2}, \quad (38)$$

или в форме, разрешенной относительно частоты ω,

$$\omega = \omega_{pd} \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + \lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}}} + \lambda_{Dd}^2 k^2 + k v_{0d}.$$
 (39)

В (38), (39) и далее используются обозначения

$$\omega_{pd}^2 = \frac{4\pi q_d^2 n_{0d}}{m_d}; \ \lambda_{De,i,d}^2 = \frac{k_B T_{e,i,d}}{4\pi e^2 n_{0e,i,d}}.$$
 (40)

Для плазмы с нулевым потоком пылинок, т. е. при $v_{0d} = 0$, уравнения (38) и (39) принимают известный вид дисперсионного соотношения для DAW, а график зависимости $\omega(k)$ (кривая 1 на рис. 6,а, б) будет симметричен относительно вертикальной оси.

Обе ветви этого графика имеют по три характерных для DAW участка: длинноволновый участок с линейным пылевым звуком со скоростью

$$c_s = \lim_{k \to \pm 0} \frac{\omega}{k} = \pm \omega_{pd} \sqrt{\frac{\lambda_{De}^2 \lambda_{Di}^2}{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2} + \lambda_{Dd}^2}, \quad (41)$$

далее следует средневолновой участок с меньшим наклоном, соответствующий DA-колебаниям, и коротковолновый «тепловой участок» с сильным затуханием по механизму Ландау. Симметричное расположение ветвей кривой 1 и знак ± в (41) означает одинаковый характер распространения волны вперед и назад.



Рис. 6. Дисперсионные кривые DAW: а – при $V_1 > v_{0i} > V_2$; б – при 1 – для плазмы с неподвижными пылинками; 2 – для плазмы с пылевым потоком. Дугообразные стрелки показывают направления поворота кривых, врезки показывают изменение линейных DAW при повороте.

Если же теперь положить $v_{0d} \neq 0$ (для определенности мы приняли, что упорядоченное движение пыли направлено назад, т. е. $v_{0d} < 0$), то кривая 1 повернется относительно начала координат по часовой стрелке на угол, тангенс которого равен v_{0d} , и займет место кривой 2 (рис. 6а и 6б). При этом симметрия графика относительно вертикальной оси теряется, а значения линейных пыле-звуковых скоростей становятся разными для направлений вперед и назад:

$$c_s = \lim_{k \to \pm 0} \frac{\omega}{k} = v_{0d} \pm \omega_{pd} \sqrt{\frac{\lambda_{De}^2 \lambda_{Di}^2}{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2} + \lambda_{Dd}^2}.$$
 (42)

Для значений скорости упорядоченного движения из диапазона $V_1 > v_{0d} > V_2$ с границами

$$V_{1} = 4\omega_{pd}\lambda_{Dd} \sqrt{\frac{\lambda_{Dd}^{2}\sqrt{4\lambda_{Dd}\left(\lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}\right)^{1/2} + 3}}{\lambda_{De}^{2} + \lambda_{Di}^{2}} + \frac{2\lambda_{Dd}^{2}}{\lambda_{De}^{2} + \lambda_{Di}^{2}} + \lambda_{Dd}\sqrt{\lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}}}{\left[\sqrt{4\lambda_{Dd}\left(\lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}\right)^{1/2} + 3} + 2\lambda_{Dd}\left(\lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}\right)^{1/2}}\right]^{3}}$$
(43)

$$V_2 = \omega_{pd} \lambda_{Dd}, \qquad (44)$$

угол поворота будет таков, что на правой ветви дисперсионной кривой 2, которая соответствует движению волны вперед, появится спадающий участок (рис. 6а). На этом участке групповая скорость направлена назад. Наличие такого участка свидетельствует о том, что на нем реализуется обратная волна. Для еще бо́льших значений скорости v_{0d}, когда выполняется $v_{0d} > V_2$, угол поворота будет достаточным для пересечения правой ветвью кривой 2 горизонтальной оси (рис. 6б). Это соответствует тому, что для длинноволнового участка, на котором частота положительна, реализуется обратная волна, а для коротковолнового участка, где частота отрицательна реализуется прямая волна с сонаправленными назад групповой и фазовой скоростями v_{ph} и v_{gr}. Значения граничных скоростей V_1 и V_2 (43) и (44) находятся достаточно просто: V₁ есть минимальный тангенс угла наклона касательной к кривой 1 или минимальная групповая скорость для кривой 1 на рис. ба и бб, а V₂ есть тангенс угла наклона коротковолновой асимптоты кривой 1.

Выводы

Таким образом, доказана возможность существования ионно-звуковых волн и DAW в форме OB в плазме, в которой существует направленный поток частиц. Было выведено и проанализировано дисперсионное уравнение для ионно-звуковых волн в двумерной постановке задачи. Показано, что ионнозвуковые волны могут существовать в форме OB. Найдены границы области на плоскости $\{k_x, k_y\}$, в которой существуют OB.

Рассмотренный в работе подход пригоден и для других классов электростатических волн в плазме: например, ленгмюровских волн в плазме с электронным потоком.

Обычно плазма представляет собой среду, которая может содержать сразу несколько фракций частиц. Тем не менее, для существования ОВ достаточно направленного движения только одной фракции частиц – носителей волны.

Описанные здесь плазменные OB открывают принципиальную возможность создания ЛОВ ионнозвукового типа.

Литература

1. Блиох К. Ю., Блиох Ю. П. // УФН. 2004. Т. 174. С. 439 [Bliokh K Yu, Bliokh Yu P *Phys. Usp.* 47 393 (2004)]

2. Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А., Савельев В. С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. М.: Радио и связь, 1985.

3. Abubakirov E. B., Denisenko A. N., Fuks M. I. et al // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002. Vol. **30**. P. 1041.

4. Веселаго В. Г. // УФН. 1967. Т. **92**. С. 517 [Veselago V. G. Sov. Phys. Usp. **10** 509 (1968)]

5. Pendry J. B. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. **85**. P. 3966.

6. Pendry J. B. // Opt. Expr. 2003. Vol. 11. P. 755.

7. Fang N., Zhang X. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 161.

8. Ingrey P. S., Hopcraft K. I., French O., Jakeman E. // Opt. Lett. 2009. Vol. 34. P. 1015.

9. Дубинов А. Е., Мытарева Л. А. // УФН. 2010. Т. 180. С. 475 [Dubinov A. E., Mytareva L. A. *Phys. Usp.* 2010. Vol. 53. P. 455].

10. Capolino F. *Applications of Metamaterials* (Boca Raton-London-NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009)

11. Cai W., Shalaev V. *Optical Metamaterials* (NY-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer, 2010)

12. Cui T. J., Smith D. R., Liu R. *Metamaterials* (NY-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer, 2010)

13. Буров В. А., Волошинов В. Б., Дмитриев К. В., Поликарпова Н. В. // *УФН*. 2011. Т. **181**. С. 1205 [Burov V. A., Voloshinov V. B., Dmitriev K. V., Polikarpova N. V. // *Phys. Usp.* 2011. Vol. **54**. P. 1165].

14. Crawford F. W., Tataronis J. A. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. **36**. P. 2930.

15. Ault E. R., Ikezi H. // *Phys. Fluids.* 1970. Vol. 13. P. 2874.

16. Schmitt J. P. M. // *Phys. Rev. Lett.* 1973. Vol. **31**. P. 982.

17. Goree J., Ono M., Wong K. L. *Phys. Fluids.* 1985. Vol. **28**. P. 2845.

18. Chen F. F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (NY: Plenum Press, 1984) [Чен Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987].

19. Meyer-Vernet N. *Basics on the Solar Wind* (Cambridge: Cambridge University Press, 2007)

20. Bohm D. The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields (NY: McGraw-Hill, 1949)

21. Allen J. E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1976. Vol. 9. P. 2331.

22. Альтеркоп Б. А., Дубинова И. Д., Дубинов А. Е. // ЖЭТФ. 2006. Т. **129**. С. 197 [Alterkop B. A., Dubinova I. D., Dubinov A. E. // *JETP*. 2006. Vol. **102**. P. 173].

23. Дубинов А. Е., Сенилов Л. А. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. **37** (19). С. 23 [Dubinov A. E., Senilov L. A. // Tech. Phys. Lett. 2011. Vol. **37**. Р. 900].

24. Каплан С. А., Цытович В. Н. // УФН. 1969. T. 97. C. 77 [Kaplan S. A., Tsytovich V. N., Sov. // *Phys. Usp.* 1969. Vol. 12. C. 42].

25. Дубинов А. Е., Сазонкин М. А. // Физ. Плазмы. 2009. Т. 35. С. 18 [Dubinov A. E., Sazonkin M. A. // Plasma Phys. Rep. 2009. Vol. **35**. P. 14].

26. Dubinov A. E., Kitayev I. N. // Physics of Wave Phenomena (in press).

27. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Физматгиз, 1960.

28. Агранович В. М., Гинзбург В. Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1965.

29. Shukla P. A. and Silin V. P. // Phys. Scripta. 1992. Vol. 45. P. 508.

30. Barkan A., Merlino R. L., and D'Angelo N. // Phys. Plasmas. 1995. Vol. **2**. P.3563.

31. Prabhakara H. R. and Tanna V. L. // Phys. Plasmas. 1996. Vol. **3**. P. 3176.

32. Pramanik J., Veeresha B. M., Prasad G., Sen A., and Kaw P. K. // Phys. Lett. 2003. Vol. A **312**. P. **84**.

33. Pieper J. B. and Goree J. // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. P. 3137.

34. Thompson C., Barkan A., D'Angelo N., and Merlino R. L. // Phys. Plasmas. 1997. Vol. 4. P. 2331.

35. Williams J. D. and Snipes E. K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. **38**. P. **84**7

36. Yaroshenko V. V., Annaratone B. M., Khrapak S. A., Thomas H. M., Morfill G. E., Fortov V. E., Lipaev A. M., Molotkov V. I., Petrov O. F., Ivanov A. I., and Turin M. V., Phys. Rev. 2004. Vol. E **69**. P. 066401.

37. Schwabe M., Zhdanov S. K., Thomas H. M., Ivlev A. V., Rubin-Zuzic M., Morfill G. E., Molotkov V. I., Lipaev A. M., Fortov V. E., and Reiter T. // New J. Phys. 2008. Vol. **10**. P.033037.

38. Kim S.-H., Heinrich J. R., and Merlino R. L. // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15. P. 090701.

39. Shukla P. K. and Mamun A. A. // New J. Phys. 2003. Vol. **5**. P. 17.

40. Shukla P. K. and Eliasson B. // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P. 25.

41. Merlino R. L., Heinrich J. R., Kim S.-H., and Meyer J. K. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2012. Vol. **54**. P. 124014.

42. Thomas E. // Jr., Phys. Plasmas 2006. Vol. 13. P. 042107.

43. Heinrich J., Kim S.-H., and Merlino R. L. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103. P. 115002.

44. Sarma S. K., Boruah A., Nakamura Y., and Bailung H. // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 053702.

45. Rao N. N., Shukla P. K., and Yu M. Y. // Planet. Space Sci. 1990. Vol. **38**. P. 543.

46. Verheest F. // Planet. Space Sci. 1992. Vol. 40. P. 1.

47. Hellberg M. A., Baluku T. K., Verheest F., and Kourakis I. // J. Plasma Phys. 2013. Vol. **79**. P. 1039.

48. Moslem W. M., Sabry R., El-Labany S. K., and Shukla P. K. // Phys. Rev. 2011. Vol. E **84**. P. 066402.

49. Selim M. M., Abdelwahed H. G., and El-Attafi M. A. // Astrophys. Space Sci. 2015. Vol. **359**. P. 25.

50. Mamun A. and Shukla P. K. // Phys. Lett. 2001. Vol. A **290**. P. 173.

51. Xue J.-K. // Phys. Plasmas. 2003. Vol. 10. P. 3430.

52. Annou K. "Effects of spherical geometry and two temperature electrons on dust acoustic waves," Astrophys. Space Sci. 2014. Vol. **350**. P. 211.

53. Merlino R. L. // J. Plasma Phys. 2014. Vol. 80. P. 773.

54. Vyalykh D. V., Dubinov A. E., L'vov I. L., Sadovoĭ S. A., and Selemir V. D. // Technical Phys. 2004. Vol. **49**. P. 1521.

ГЕНЕРАЦИЯ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОХОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

А. С. Тищенко, Д. О. Замураев, А. Л. Шамраев, К. В. Сафронов, Д. С. Гаврилов, <u>С. Ф. Ковалева</u>

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В докладе представлены результаты исследования генерации предымпульсов в многопроходных лазерных усилителях, обнаруженных при измерении временного контраста выходного импульса фемтосекундной лазерной установки СОКОЛ-Ф. Измерения отношения энергии предымпульсов к энергии основного импульса проводились при помощи быстродействующего фотодиода и абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями. Сделан вывод о том, что предымпульсы выходного усилителя не превышают порог ионизации твердотельной мишени при проведении экспериментов с интенсивностью >10²⁰ Вт/см².

Введение

Временной контраст лазерного импульса является одним из важнейших параметров исследовательских лазерных установок. Временным контрастом принято называть отношение плотности мощности (интенсивности) основного лазерного импульса к интенсивности предшествующего ему излучения любой временной формы, будь то относительно короткие предымпульсы, либо относительно длинные «пьедесталы».

$$K = I_0/I_P,$$

где I_0 – интенсивность основного импульса, I_P – интенсивность предымпульсов или пьедестала.

В контексте экспериментов по взаимодействию высокоинтенсивного излучения с веществом следует иметь в виду два важных параметра мишени: порог ионизации и порог разрушения. Ионизация зависит от плотности мощности (интенсивности) излучения и порог ионизации для металлов составляет величину, близкую к 10¹² Вт/см². Разрушение мишени зависит от плотности энергии (флюенса) и для импульсов длительностью около 1 нс для металлов составляет величину порядка нескольких Дж/см² [1]. Если интенсивность излучения, предшествующего основному импульсу, превышает порог ионизации, то основной импульс будет взаимодействовать не с поверхностью мишени, а с плазмой, что существенно модифицирует механизм поглощения лазерного излучения. Превышение порога разрушения приводит к повреждению поверхности или даже разрушению мишени еще до прихода основного импульса.

Для лазерных систем с ультракороткой длительностью импульсов (10⁻¹⁴...10⁻¹¹ с), построенных по схеме усиления чирпированного импульса, на нескольких пересекающихся временных интервалах можно выделить четыре основных вида излучения, предшествующего основному импульсу (рис. 1) [1, 2].



Рис. 1. Временные окрестности лазерного ультракороткого импульса (УКИ)

 «Наносекундные» предым пульсы – им пульсы с длительностью масштаба длительности основного УКИ, расположенные на временном интервале от нескольких десятков до нескольких единиц наносекунд до основного УКИ. Возникают вследствие ограниченного быстродействия и контраста оптических затворов, а также генерируются в многопроходных усилителях.

 «Пикосекундные» предымпульсы – импульсы с длительностью масштаба длительности основного УКИ, расположенные на расстоянии десятков сотен пикосекунд до основного импульса. Генерируются в результате нелинейного взаимодействия постимпульсов с основным чирпированным импульсом в процессе усиления [3].

3. «Пикосекундный» пьедестал, начало которого становится различимым на расстоянии сотни... нескольких десятков пикосекунд до основного УКИ, возникает в результате апертурного обрезания спектра в компрессоре и неточности его юстировки, влияния нескомпенсированных спектрально-фазовых модуляций высокого порядка.

4. Усиленная спонтанная эмиссия (amplified spontaneous emission, ASE), вызванная флюоресценцией «накачанных» активных элементов на различных стадиях усиления.

«Наносекундные» и «пикосекундные» предымпульсы, а также «пикосекундный» пьедестал могут приводить к ионизации вещества мишени, а усиленная спонтанная эмиссия может приводить к нагреву и повреждению поверхности твердотельной мишени и разрушению тонких фольг. Для измерения контраста во временном диапазоне нескольких сотен пикосекунд до основного импульса, как правило, применяется кросс-коррелятор третьего порядка.

Для обнаружения предым пульсов на расстоянии от нескольких наносекунд до основного импульса используется быстродействующая фотоэлектрическая диагностика.

Фемтосекундная лазерноя установка Сокол-Ф

Настоящая работа проведена на мультитераваттной фемтосекундной лазерной установке Сокол-Ф.

Она представляет собой классический пример лазерной системы, построенной по схеме усиления чирпированного импульса (chirped pulse amplification, CPA) на основе активных элементов (AЭ) из сапфира, активированного титаном (Ti:Al₂O₃, Ti:Sa).

Оптическая структурная схема установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Установка Сокол-Ф. Схема оптическая структурная: ЗГ – задающий генератор; Стр-р – стретчер; СФ – система фокусировки; КФИ – компрессор фемтосекундных импульсов; М – мишень; УТ – усилительный тракт: РУ – регенеративный усилитель, ПУ – предварительный усилитель, У – четырехпроходный усилитель, МУ – четырехпроходный мощный усилитель; СК – система контрастирования: Б – бустер, СИ – селектор импульсов, НП – насыщающийся поглотитель

В состав установки входят: задающий генератор, стретчер, усилительный тракт, компрессор фемтосекундных импульсов, система фокусировки, которая фокусирует излучение на мишень.

В состав УТ входят четыре усилителя: регенеративный усилитель, пятипроходный предварительный усилитель, четырехпроходный усилитель и четырехпроходный мощный усилитель.

Основным отличием от классической СРА-схемы является наличие перед стретчером системы контрастирования, в состав которой входит многопроходовый усилитель прямого усиления – бустер, селектор импульсов и насыщающийся поглотитель. СК эффективно подавляет спонтанную эмиссию ЗГ.

Параметры установки позволяют проводить эксперименты при интенсивности на мишени >10²⁰ Вт/см².

Исследование наносекундного контраста

Исследования контраста в наносекундном временном диапазоне проводились в зашкальных экспериментах при помощи фотодиода и набора абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями. Регистрация сигнала фотодиода осуществлялась при помощи цифрового запоминающего осциллографа LeCroy WaveJet 300А. Измерения проводились при установке фотодиода на выходе КФИ. Для концентрации лазерного излучения на чувствительной площадке приемника применялось вогнутое зеркало, фильтры устанавливались в коллимированном пучке (до вогнутого зеркала). Измерения проводились без накачки выходного усилителя (МУ), все другие компоненты лазерной системы были задействованы в штатном режиме.

Длительность импульсной характеристики регистрирующей аппаратуры $\sim 1,3$ нс FWHM (рис. 3). Поскольку, длительность импульсной характеристики значительно превышает длительность основного УКИ и любого типичного предымпульса, то амплитуды регистрируемых сигналов пропорциональны энергии УКИ и предымпульсов. Таким образом, эти измерения не позволяют судить об отношениях интенсивностей основного импульса и регистрируемых предымпульсов, но позволяют судить о соответствующих отношениях энергий. То есть для того, чтобы приписать предымпульсам некоторое значение интенсивности, кроме фотоэлектрических измерений необходимо еще измерить, или хотя бы оценить, длительность предымпульсов.



Рис. 3. Импульсная характеристика регистрирующей аппаратуры при измерении наносекундного контраста

При выполнении измерений наносекундного контраста была обнаружена сложная структура предымпульсов, локализованных на временном интервале ~ 32...5 нс до основного УКИ. При исключении из оптической схемы лазера выходного четырехпроходного МУ (система накачки которого не была задействована ранее) некоторые из предымпульсов пропали. На основании этого опыта нами был сделан вывод о том, что оптические схемы многопроходных усилителей являются источником «наносекундных» предымпульсов.

Генерация предымпульсов в многопроходных усилителях

Нам не удалось за доступное короткое время найти в литературе какого-либо достоверного описания обнаруженного эффекта генерации предымпульсов в многопроходных лазерных усилителях. Поэтому нами была предпринята попытка прояснить природу этих предымпульсов, оценить их опасность с точки зрения предионизации мишени при проведении экспериментов.

Три последних усилителя лазерной системы построены по общепринятой схеме «бабочка» (рис. 4), в состав которой входят зеркала и АЭ. Кроме этого в выходном МУ применяется криогенное охлаждение АЭ, поэтому кристалл Ті: Sa размещен внутри криостата, то есть в оптической схеме дополнительно присутствуют два оптических окна.

Для выявления источника предымпульсов, генерируемых выходным усилителем, были демонтированы окна криостата и АЭ, после чего предымпульсы, характерные для выходного усилителя, не были зарегистрированы. Последовательная установка в оптическую схему АЭ и одного за другим оптических окон привели к появлению предымпульсов. Вклад АЭ в энергию предымпульсов приблизительно вдвое меньше равного вклада каждого из двух окон. Таким образом, источником предымпульсов в многопроходном усилителе являются не зеркала, а любой преломляющий оптический элемент (кристаллический АЭ или стеклянное окно), установленный в схему усилителя.



Рис. 4. Четырехпроходный усилитель. Схема оптическая принципиальная: 31, 32,...38 – зеркала; Ti:Sa – активный элемент из Ti:Al₂O₃

Путем блокировки распространения основного лазерного импульса (ЛИ) на последовательных проходах через усилитель определены моменты генерации и пути распространения предымпульсов.

Предымпульсы появляются в результате рассеяния рабочего ЛИ при прохождении через АЭ (а также оптические окна криостата). Количество предымпульсов зависит от числа проходов через АЭ, а временное расстояние между предымпульсами и рабочим ЛИ зависит от расстояния между зеркалами усилителя.

В четырехпроходовой схеме усилителя генерируются следующие предым пульсы:

– предымпульс S1-1. Возникает в результате рассеяния на первом проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 38 – выход. Опере-

жает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 32 – 33 – 34 – 35 – 36 – 37 – Ti:Sa;

– предымпульс S1-2. Возникает в результате рассеяния на первом проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti: Sa – 36 – 37 – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti: Sa – 32 – 33 – 34 – 35 – Ti: Sa;

– предымпульс S2-1. Возникает в результате рассеяния на втором проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 34 – 35 – 36 – 37 – Ti:Sa;

– предымпульс S2-2. Возникает в результате рассеяния на втором проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 36 – 37 – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa — 34 – 35 – Ti:Sa;

– предымпульс S3-1. Возникает в результате рассеяния на третьем проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa –38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa –36 – 37 – Ti:Sa;

Поскольку, как правило, схема усилителя в достаточной мере симметрична, то есть расстояния, преодолеваемые излучением между последовательными проходами через АЭ, приблизительно одинаковы. Обозначим это расстояние *L*. Тогда эти пять предымпульсов при регистрации с помощью фотодиода и осциллографа сгруппированы в три группы, равноудаленные друг от друга и от основного импульса (см. рис. 5).



Рис. 5. Предымпульсы четырехпроходового усилителя. *L* – длина пути между последовательными проходами через АЭ, *c* – скорость распространения электромагнитного излучения

Так как в схеме УТ нет пространственных фильтров, то эти предымпульсы проходят по УТ, через КФИ до выхода установки.

Для выходного четырехпроходового МУ характерны предымпульсы, опережающие основной ЛИ на ~10,5; ~21; ~32 нс, с отношением энергии основного УКИ и энергии предымпульсов $E_0/E_P \sim 5 \cdot 10^6$.

Для предпоследнего четырехпроходового усилителя характерны предымпульсы, опережающие
основной УКИ на ~4; ~8; ~12 нс, с отношением энергии $E_0/E_P \sim 2.10^7$.

Для пятипроходового ПУ характерны предымпульсы, опережающие основной УКИ на ~2,5; ~5; ~7,5; ~10 нс с отношением энергии $E_0/E_P \sim 5 \cdot 10^6$.

На осциллограмме, представленной на рис. 6, отображены предымпульсы предпоследнего четырехпроходного усилителя, локализованные на временном расстоянии 12 и 8 нс до основного импульса. Предымпульс на расстоянии 4 нс скрыт более мощным предымпульсом из предыдущего пятипроходового ПУ на расстоянии 5 нс.

В пятипроходовом усилителе из ряда возможных зарегистрирован один предымпульс, расположенный на расстоянии 5 нс до рабочего ЛИ (расстояние двух проходов через АЭ). Еще один из возможных предымпульсов ПУ, расположенный на расстоянии ~2,5 нс до основного УКИ, вероятно, скрыт нарастающим сигналом усиленной спонтанной эмиссии.



Рис. 6. Зашкальный эксперимент при измерении наносекундного контраста. Правый курсор соответствует положению основного ЛИ. Левый курсор установлен в положении -10,8 нс. Предымпульсы -12 и - 8 нс из четырехпроходового усилителя, предымпульс -5 нс из пятипроходового

Длительность предымпульсов многопроходных усилителей

Отдельно измерить длительность многопроходных усилителей на данный момент не удалось. Тем не менее, каждый предымпульс по сравнению с основным УКИ совершает по крайней мере на один проход через АЭ меньше. Для пятипроходного ПУ это 15 мм кристалла Ti:Sa, а для четырехпроходного МУ это 30 мм Ti:Sa и 40 мм стекла. Вследствие этого на входе в КФИ предымпульсы и основной ЛИ обладают различными параметрами чирпа, а, следовательно, отличающейся длительностью на выходе КФИ и на мишени. При минимальной длительности основного УКИ длительность самого короткого предымпульса из пятипроходного ПУ по крайней мере вдвое больше. Увеличение толщины АЭ, наличие дополнительных окон и увеличение количества недостающих проходов также увеличивает длительность предымпульса.

Кроме этого, каждый предымпульс, зарегистрированный фотоэлектрической диагностикой, представляет собой несколько импульсов, сгенерированных на разных поверхностях АЭ (и окнах криостата), на разных проходах через усилитель и прошедших слегка различными путями. То есть каждый предымпульс на осциллограмме на самом деле представлен группой из нескольких неразрешаемых предымпульсов. Этот фактор также снижает пиковую мощность предымпульсов.

Фокусировка предымпульсов многопроходных усилителей

Поскольку источником предымпульсов, генерируемых в многопроходных усилителях, является рассеяние на кристалле (диффузно излучающий объект конечного размера на конечном расстоянии от фокусирующей оптики), то эти предымпульсы не обладают пространственными характеристиками рабочего ЛИ. Следовательно, предымпульсы концентрируются на мишени в пятна гораздо большего размера, чем основное фокальное пятно. Были зарегистрированы изображения дальней зоны рабочего УКИ и предымпульсов, генерируемых в выходном четырехпроходном МУ (рис. 7).



Рис. 7. Изображения в дальней зоне: слева – предымпульсы выходного усилителя (диаметр на полувысоте 404 мкм), справа – рабочий ЛИ (масштаб увеличен в 10[×] по сравнению с левым изображением, диаметр на полувысоте 3,3 мкм)

Размер пятна, в которое концентрируется излучение предымпульсов на два порядка больше фокального пятна рабочего ЛИ, площадь, соответственно на 4 порядка. Зная коэффициент ослабления фильтров при регистрации изображений, была сделана оценка плотности энергии предымпульсов в фокальной плоскости, которая составляет ~10⁻¹⁰ от плотности энергии в фокальном пятне рабочего ЛИ.

Таким образом, даже если предым пульсы из выходного усилителя на выходе КФИ имеют ультракороткую длительность, то их интенсивность не превышает $\sim 10^{-10}$ от интенсивности рабочего ЛИ и они в экспериментах с интенсивностью основного УКИ ~ 10²⁰ Вт/см² не могут ионизировать мишень. Однако, по мере удаления источника предымпульсов от фокусирующего зеркала (рассеяние в АЭ на ранних стадиях усиления) пространственные характеристики предымпульсов могут значительно приблизиться к характеристикам рабочего ЛИ, и предымпульсы будут фокусироваться на мишень в пятно гораздо меньшего размера.

Заключение

При выполнении работы зарегистрированы предымпульсы, генерируемые в многопроходных усилителях Ті: Sa фемтосекундной мультитераваттной лазерной системы.

На примере выходного четырехпроходного усилителя экспериментально установлено, что источником предымпульсов является рассеяние основного лазерного импульса при проходе через активный элемент и окна криостата.

Для всех трех линейных многопроходных усилителей, собранных по схеме «бабочка», определена временная локализация предымпульсов и измерены отношения энергии предымпульсов и основного УКИ.

Измерены параметры фокусировки предымпульсов входного мощного усилителя, определены отношения плотностей энергии предымпульсов и основного УКИ. Показано, что предымпульсы выходного усилителя не могут ионизировать мишень в экспериментах с доступной интенсивностью рабочего излучения ~ 10^{20} Вт/см².

Параметры фокусировки предымпульсов, генерируемых на ранних стадиях усиления, измерены не были. При этом предполагается существенное приближение к пространственным характеристикам основного УКИ. В связи с этим, наибольшее беспокойство вызывают предым пульсы, генерируемые в пятипроходном предварительном усилителе. Предполагая острую фокусировку предым пульсов, с учетом измеренной относительной энергии и минимального двукратного увеличения длительности предым пульсов в экспериментах интенсивность предым пульсов может приближаться к порогу плазмообразования ~ 10¹² Вт/см².

Для подавления предымпульсов пятипроходного предварительного усилителя и следующего за ним четырехпроходного усилителя запланирована модернизация электрооптического изолятора обратноотраженного мишенью излучения на основе ячейки Поккельса [4], установленного на выходе четырехпроходного усилителя.

Литература

1. Fourmaux S., Payeur S., Buffechoux S., Lassonde P., St-Pierre C., Martin F., and Kieffer J. C. Pedestal cleaning for high laser pulse contrast ratio with a 100 TW class laser system // OPTICS EXPRESS. 2011. Vol. 19. No. 9. P. 8486–8497.

2. Keppler S., Sävert A., Körner J., Hornung M., Liebetrau H., Hein J., Kaluza M. C. The generation of amplfied spontaneous emission in high-power CPA laser systems // Laser Photonics Rev. 2016. Vol. 10. No. 2. P. 264–277.

3. Didenko N. V., Konyashchenko A. V., Lutsenko A. P., Tenyakov S. Yu. Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses // OPTICS EXPRESS. 2008. Vol. 16. No. 5. P. 3178–3190.

4. Zeil K, *et al.* The scaling of proton energies in ultrashort pulse laser plasma acceleration // New Journal of Physics. 2010. Vol. **12**. P. 045015

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ

<u>Г. А. Козлов</u>, Е. Н. Богданов, А. В. Родионов, М. Е. Шаврин, А. В. Федоров, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, И. С. Гнутов, А. О. Яговкин

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

Введение

Исследования поведения газов в экстремальных состояниях представляют интерес с точки зрения верификации широкодиапазонных уравнений состояния. Эти уравнения состояния необходимы, например, при решении проблемы осуществления инерциального термоядерного синтеза, а также при моделировании процессов образования и эволюции звезд и гигантских газовых планет.

Для изучения свойств газов при высоких давлениях и температурах широко применяется нагружение ударными волнами. Благодаря развитию методической базы и повсеместному внедрению методик допплеровской диагностики, имеется возможность продвинуться в исследованиях ударно-волнового сжатия газов, которые под воздействием импульсных давлений и температур являются плотной неидеальной плазмой.

В настоящем докладе представлены результаты экспериментов по исследованию ударно-волновой сжимаемости плотного газообразного дейтерия ($P_0 = 15$ атм.). Исследования проведены с применением двух независимых методик непрерывной допплеровской диагностики – гетеродин-интерферометра PDV ($\lambda = 1550$ нм) и радиоинтерферометра ($\lambda = 3,2$ мм).

Постановка экспериментов

Проведено четыре взрывных эксперимента по определению динамических характеристик ударносжатого дейтерия. Каждому эксперименту соответствовала определенная область давлений ударного сжатия, которая достигалась с использованием определенных нагружающих устройств. Эскизы экспериментальных сборок с различным типом нагружающих устройств представлены на рис. 1 и 2.

Тип нагружающего устройства, толщина ударника и экрана экспериментальной сборки, а также размер и состав активного заряда взрывчатого вещества в каждом опыте представлены в табл. 1.



Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки № 1: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плосковолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – воздушный зазор 5 мм; 7 – экран, алюминий; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод; 11 – окно; 12 – обойма; 13 – оптическое волокно методики PDV; 14 – излучатель радиоинтерферометра



Рис. 2. Эскиз экспериментальной сборки № 2: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – плосковолновой генератор; 5 – заряд ВВ; 6 – ударник, алюминий; 7 – стойка; 8 – экран, алюминий; 9 – корпус; 10 – трубопровод; 11 – окно; 12 – обойма; 13 – оптическое волокно методики PDV; 14 – излучатель радиоинтерферометра

Таблица 1

	1 1		1.2	· • • 1
Опыт	Эксп. сборка	<i>h</i> ударни- ка, мм	<i>h</i> эк - рана, мм	Заряд ВВ и его размер
1	Nº 1	-	4	BB на основе гексогена Ø120×40
2	Nº 2	6	4	THT Ø120×80
3	№ 2	6	4	BB на основе гексогена Ø120×80
4	№ 2	4	4	ВВ на основе гексогена Ø120×180

Характеристики нагружающих устройств

Ударная волна в исследуемом газе заданной амплитуды создавалась при распаде разрыва на границе с алюминиевым экраном. В устройствах первого типа (см. рис. 1) она генерируется в экране при торможении продуктов взрыва заряда мощного вторичного взрывчатого вещества, в устройствах второго типа (см. рис. 2) – при торможении алюминиевого ударника, разгоняемого на базе 36 мм продуктами детонации активного заряда. Инициирование детонации в активном заряде взрывчатого вещества осуществлялось с использованием плосковолнового генератора.

Заполнение газом экспериментальных сборок производилось от автоматизированной системы напуска, с использованием в качестве источника дейтерия металлогидридного генератора на основе ванадия. Величина давления в процессе заполнения сборки измерялась датчиком давления WIKA (диапазон измерения 0...250 кг²/см, класс точности 0,5).

На момент подрыва экспериментальных сборок давления дейтерия внутри сборок составляло 15 атм., начальная температура $T_0 = 10$ °C, начальная плотность дейтерия при данной температуре и давлении составляет $\rho_0 = 0,00262$ г/см³.

Регистрация движения поверхности алюминиевого ударника и момента прихода ударной волны в дейтерии на отсечку из полиметилметакрилата (окно 11 на рис. 1 и 2) осуществлялась с помощью 4-х канального комплекса гетеродин-интерферометра [1]. Метод измерений основан на регистрации интерференционного оптического сигнала с длиной волны зондирующего излучения (λ = 1550 нм), несущего информацию о доплеровском сдвиге частоты зондирующего излучения при его отражении от движущейся поверхности с помощью высокочастотных фотодетекторов инфракрасного излучения с шириной полосы до 25 ГГц и широкополосного осциллографа с аналогичной шириной полосы пропускания. После выполнения обработки экспериментальных данных по алгоритму оконного преобразования Фурье с помощью полученных спектрограмм определяются скорости движения объектов.

Для тех же целей в опытах применялся радиоинтерферометр (РИФ) ПРИ-03, предназначенный для измерения перемещений и скоростей физических объектов, которые способны отражать радиоволны миллиметрового (3,2 мм) диапазонов длин волн [1]. Результатом регистрации является сигнал-интерферограмма на частоте, равной разности частот принимаемых и излучаемых радиоинтерферометром радиоволн — интерферограмма. После обработки интерферограммы в цифровой форме вычисляется ее текущая фаза и частота. Результаты вычислений регистрируются как функции времени. Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы несут информацию о перемещении и мгновенной скорости отражающего объекта. Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены результаты регистрации с помощью гетеродин-интерферометра. Представленные профили скорости демонстрируют возможность регистрации не только движения свободной поверхности ударника, но и моменты прихода ударной волны в дейтерии на границу с окном из полиметилметакрилата (ПММА).



Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности экрана и границы раздела экран – окно ПММА от времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром

На рис. 4 представлены зависимости скорости свободной поверхности экрана о времени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром и радиоинтерферометром. Сравнение результатов демонстрирует согласие между двумя методиками, которое свидетельствует об отражении микроволнового излучения только от поверхности экрана. Следовательно, в опытах не зарегистрировано превышения проводимости ударно-сжатого дейтерия выше 0,001 См/см, а определение скорости ударной волны в дейтерии при начальном давлении $P_0 = 15$ атм. в диапазоне скоростей 2–5,6 км/с радиоинтерферометром невозможно.

Полученные с помощью методики гетеродининтерферометра данные позволяют получить информацию о параметрах ударно-волновой сжимаемости дейтерия. Средняя по базе измерения 10 мм скорость ударной волны в дейтерии D определялась по моментам времени начала движения свободной поверхности экрана и выхода ударной волны на поверхность оптического окна из ПММА. Массовая скорость U определялась путем усреднения скорости движения экрана на базе измерения. Данная процедура применялась для каждого из четырех каналов регистрации, после чего производилось усреднение. В табл. 2 представлены результаты определения характеристик ударного сжатия с помощью гетеродининтерферометра и радиоинтерферометра. Представленные в табл. 2 результаты демонстрируют согласие между двумя методиками регистрации скорости движения свободной поверхности экрана.

Данные методики гетеродин интерферометра были использованы для определения параметров ударного сжатия дейтерия, для этого использованы законы сохранения массы и импульса.

На рис. 5 в D-U-переменных, а на рис. 6 в $P(\rho)$ -переменных, представлены полученные в настоящей работе методикой гетеродин-интерферометра точки на ударной адиабате дейтерия в сравнении с результатами расчета с уравнением состояния дейтерия Копышева–Хрусталева [2]. Учитывая, что на каждую точку на ударной адиабате проводился всего один эксперимент, наблюдается неплохое согласие в пределах погрешности измерений экспериментальных данных с результатами расчета с использованием уравнения состояния Копышева–Хрусталева.





Результаты экспериментов

Таблица 2

Опыт	<i>U</i> , км/с (РИФ)	<i>U</i> , км/с (PDV)	<i>D</i> , км/с (PDV)	<i>Р</i> , ГПа	р, г ³ /см
Nº 1	$2,20{\pm}0,07$	2,22±0,15	2,91±0,04	$0,0184{\pm}0,0015$	$0,0109{\pm}0,0016$
Nº 2	3,64±0,11	3,63±0,13	$4,44{\pm}0,05$	$0,0438 \pm 0,002$	$0,0145 \pm 0,0016$
Nº 3	4,27±0,12	4,28±0,15	5,11±0,03	$0,0588 {\pm} 0,0025$	$0,0161\pm0,0022$
Nº 4	5,49±0,06	5,57±0,08	6,60±0,04	$0,0978 \pm 0,002$	$0,0169 \pm 0,0008$



Рис. 5. Зависимость волновой скорости от массовой скорости на ударной адиабате дейтерия ($P_0 = 15$ атм., $T_0 = 10$ °C): 1 – экспериментальные данные; 2 – результат расчета с использованием уравнения состояния Копышева–Хрусталева



Рис. 6. Зависимость давления от плотности на ударной адиабате дейтерия ($P_0 = 15$ атм., $T_0 = 10$ °C)

Выводы

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости газообразного дейтерия, изначально находившегося при начальном давлении 15 атм. и температуре $T_0 = +10$ °C, в диапазоне волновых скоростей от 2,9 до 6,6 км/с.

В каждом опыте методикой гетеродин-интерферометра PDV регистрировались зависимости скорости движения металлического экрана от времени и моменты выхода ударной волны в дейтерии на поверхность оптического окна, а также скорость границы раздела экран-окно. Зависимости скорости движения экрана от времени, зарегистрированные методикой микроволновой диагностики, согласуется с результатами измерений методикой гетеродининтерферометра, при этом в проведенных опытах не зарегистрировано превышения проводимости ударно-сжатого дейтерия выше 0,001 См/см.

Полученные в экспериментах данные по ударноволновой сжимаемости плотного газообразного дейтерия согласуются с результатами расчета с использованием уравнения состояния Копышева–Хрусталева.

Литература

1. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А. Л. Михайлова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 322

2 Копышев В. П., Хрусталев В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПТМФ. 1980. № 1. С. 122–128.

4-Х КАДРОВЫЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ПОВЫШЕННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Д. С. Корниенко, Д. Н. Литвин, А. Г. Кравченко, В. В. Мисько, В. М. Тараканов

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

Введение

Для изучения быстропротекающих процессов, таких как возмущение в газах и жидкостях, распространение ударных волн, обтекание тел, кинетика взрывных процессов, динамика выброса частиц из вещества часто используется метод скоростной кадровой съемки.

В ИЛФИ на лазерных моделирующих установках проводятся такие исследования с созданием ударных нагрузок на различные материалы уровня сотен килобар – десятков мегабар. Основной сложностью в этих исследованиях является необходимость работы с малоразмерными образцами, повышенные требования к быстродействию и пространственному разрешению методик диагностики.

Ранее в ИЛФИ был разработан 9-ти кадровый регистратор СЭР-7 [1], который использовался для регистрации различных процессов, например динамики плазменных образований.

Результаты проведенных исследований показали насущную потребность в повышении информативности регистрации. Так СЭР-7, у которого при пространственном разрешении ≤25 пар штр./мм все девять кадров размещались на выходном экране ø25 мм. В результате регистрируемые кадры имели размерность не более 100×100 разрешаемых элементов. При пространственном разрешении 20 мкм поле зрения имело явно недостаточный размер ~1 мм. Кроме того, переход к большим скоростям частиц потребовал сокращения минимальной длительности экспозиции каждого кадра с 1 мкс до не более 100 нс и увеличения частоты съемки до не менее 3 МГц.

Для выполнения этих задач была проведена разработка нового электронно-оптического регистратора СЭР-8, чему и посвящена данная работа.

Разработка высокоскоростной 4-х кадровой камеры повышенного разрешения СЭР-8

К основным недостаткам существующего варианта камеры СЭР-7 [1], следует отнести:

малое количество разрешаемых элементов в изображении;

– большая минимальная экспозиция 1 мкс.

Для изучения более скоростных процессов требуется уменьшения минимальной длительности экспозиции кадра с 1 мкс до не более 100 нс, при увеличении частоты съемки с 1 МГц до 3 МГц и больше. Поэтому была проведена разработка новой высокоскоростной многокадровой камеры повышенного разрешения СЭР-8.

Для обеспечения высокого пространственного разрешения была изменена структурная концепция регистратора. Было предложено формировать каждый кадр на отдельном электронно-оптическом преобразователе (ЭОП), сочлененным с собственной ПЗС-камерой (прибор с зарядовой связью). Такой шаг делает не обязательным использование дорогостоящего ЭОП с анализирующим время каскадом. Достаточным является ЭОП – усилитель яркости с затвором на микроканальной пластине (МКП). Длительность и момент экспозиции, а также чувствительность камеры задается импульсом питания МКП, подаваемым в соответствующий момент с требуемой амплитудой. При системе один кадр – один ЭОП, весь размер катода можно использовать для изображения объекта. Рабочий размет катода ЭОП составляет 16мм – таким образом, пространственное разрешение разрабатываемой камеры возросло примерно в 3 раза.

Количество кадров в разрабатываемой камере задается количеством используемых ЭОП. Опыт работы с камерой СЭР-7 показал, что для проведения измерений динамики какого-либо процесса требуется не менее 3 – 4 кадров. Исходя из этого, для разрабатываемого регистратора был выбран 4х кадровый вариант, хотя количество кадров может быть увеличено за счет постановки дополнительных ЭОП и ПЗС-камер.

Структурная схема СЭР-8

СЭР-8 состоит из 4 одинаковых каналов (см. рис. 1), а также общих для всех каналов блоков, обеспечивающих их работу:

- блок низковольтного питания;
- блок высоковольтного питания;
- модуль управления.

Модуль управления, подавая поочередно в соответствующие моменты на вход генераторов кадровых импульсов импульсы управления, длительность которых определяет длительность экспозиции кадра. Кроме этого, модуль управления формирует сигналы запуска режима регистрации ПЗС-камер. Общий запуск цикла регистрации камеры осуществляется сигналом, приходящим на вход модуля управления.



Рис. 1. Схема камеры СЭР-8: 1 – блок низковольтного питания, 2 – блок высоковольтного питания, 3 – модуль управления, 4 – генератор кадрового импульса, 5 – усилитель яркости (ЭОП), 6 – ПЗС-камера, 7 – персональный компьютер

Предусмотрены электрический, оптический синхронные сигналы, а также сигнал запуска, формируемый вручную от кнопки. Модуль управления позволяет устанавливать задержку между моментом прихода синхроимпульса и началом цикла регистрации, а также частоту и длительность экспозиции кадров.

Каждый кадровый канал состоит из генератора кадрового импульса (ГКИ), ЭОП (усилителя яркости) и ПЗС-камеры. На рис. 1 для упрощения показаны только два канала.

Электронно-оптический преобразователь

В основу разрабатываемой камеры нами положен обладающий требуемыми техническими характеристиками и доступный усилитель яркости ЭПМ-61Г производства «МЭЛЗ-ФЭУ» с многощелочным фотокатодом и микроканальной пластиной. Прибор снабжен оптоволоконными входом и выходом. Этот ЭОП уже был успешно применен нами в разработанном в 2013 г. фотохронографе СЭР-5 [2]. Основные параметры ЭОП ЭПМ 61Г – диаметр входного и выходного окон ~ 25мм, разрешающая способность не менее 36 штрихов/мм, динамический диапазон не менее 4000.

Альтернативой ЭПМ-61Г является бипланарный ЭОП ТПО25, недавно разработанный в ФГУП «ВНИИА». Их преимуществом является почти на 2 порядка меньшая яркость темнового фона и в 2,5 раза меньшие габариты, по сравнению с ЭПМ-61Г. Другие основные технические характеристики этих приборов совпадают.

Устройство съема информации

Для считывания кадра с экрана ЭОП была применена ПЗС-камера S2C-017 APF производства АО «НПП СИЛАР». Она имеет волоконно-оптическую пластину на входе, что обеспечивает непосредственный контакт экрана усилителя яркости и ПЗС-камеры. Как по пространственному разрешению, размерам, так и по остальным характеристикам ЭОП и матрица хорошо сочетаются между собой. Основные характеристики камеры: число пикселей – 1040×1160, размер пикселя – 16×16 мкм, динамический диапазон – 4000.

Зарегистрированные ПЗС-камерами кадры передаются в персональный компьютер (см. рис. 1).

Параметры регистратора СЭР-8

Подводя итоги этого раздела, приведем характеристики созданной 4-х кадровой камеры СЭР-8:

- частота кадров до 10 МГц;
- время обзора от 400 нс до 500 мкс;

длительность экспозиции кадра от 50 нс до 16 мкс;

– время задержки пуска от 150 нс до 150 мкс.

Оптическая схема регистратора СЭР-8

Лучшим вариантом оптической схемы является деление входного пучка с помощью светоделительных кубов. Такая схема имеет не очень большие габариты и проста в настройке [3]. Поэтому для разрабатываемой камеры было применено именно деление светового пучка с помощью светоделительных кубов, как показано на рис. 2. Основные требования к кубам: обеспечение требуемого пространственного разрешения, коэффициенты деления должны обеспечить примерно одинаковую интенсивность на камерах, кубы должны быть не поляризующими, чтобы сохранялись коэффициенты деления при последовательной их постановке.

Измерительный объектив устанавливается вне корпуса камеры. Такой подход делает систему более гибкой, легко адаптируемой к условиям и целям эксперимента. За счет выбора типа, фокусного расстояния, положения объектива можно менять масштаб построения объекта, пространственное разрешение и поле зрения.

Проверка пространственного разрешения регистратора проводилась при двух масштабах построения изображения. В первом случае в качестве объекта была взята мира ГОИ № 4. Изображение на входе ЭОПов строилось с помощью объектива О-2 с фокусом f = 60см. Масштаб перестроения – М1:1.

Обработка показала, что предельное пространственное разрешение (при контрасте К = 3-5 %) для всех 4-х каналов составило 25 штр/мм, что примерно соответствует ожидаемому пространственному разрешению системы из двух соединенных последовательно элементов с пространственным разрешением 33 пары линий на миллиметр.

Для проверки соответствия камеры предъявляемым к ней требованиям по предельному пространственному разрешению была проведена съемка тестобъекта – миры ГОИ № 3 с масштабом перестроения М5:1. На рис. 3 приведены результаты съемки миры ГОИ № 3.



Рис. 2. Оптическая схема 4-х кадрового регистратора: 1 – объектив, 2 – светоделительные кубы, 3 – ЭОПы с ПЗС-камерами, 4 – тест-объект мира ГОИ № 4



Рис. 3. Изображения миры № 3, при съемке с оптическим увеличением М5:1

Период 25 поля миры № 3 составляет 20 мкм (50 пар штрихов на миллиметр). На прописи полученного изображения шаг миры составил 0,1 мм, что с учетом масштаба увеличения оптической схемы соответствует 20 мкм по объекту. Таким образом, показано, что при съемке с масштабом увеличения М5:1, методика обладает пространственным разрешением не хуже 20 мкм при этом коэффициент контраста составляет K = 55 %.

Рабочий размер фотокатода составляет 16 мм. При съемке с оптическим увеличением M5:1 поле зрение методики составляет не менее 3 мм.

Экспериментальная проверка работоспособности регистратора

С целью проверки работоспособности регистратора в условиях реального эксперимента были сделаны модельные эксперименты на электро-разрядном генераторе. С помощью специального генератора осуществлялся быстрый взрыв проволочки, разлетающиеся фрагменты которой регистрировались камерой СЭР-8.

Для съемки были выбраны следующие режимы работы камеры: задержка съемки после пуска в первом срабатывании – 10 мкс, во втором – 30 мкс. Экспозиция кадров – 0,5 мкс, период следования кадров – 5 мкс.

Полученная регистрация, представленная на рис. 4, демонстрирует динамику свечения и разлета элементов проволочки. Увеличение задержки запуска во втором срабатывании позволило увидеть более позднюю фазу взрыва проволочки.

Обработка полученных кадров дала следующие результаты: скорость разлета частиц проволочки составила V = 120 м/с (±20 %). Размер частиц – 1 мм (±20 %).

Проведенные эксперименты показали работоспособность регистратора СЭР-8.



Рис. 4. Результаты регистрации 4-х кадровой камерой: а – настроечный кадр; б1-б4 – кадры регистрации разлета проволочки, снятые с задержкой 10мкс после срабатывания генератора; в1-в4 – кадры регистрации разлета проволочки, снятые с задержкой 30мкс после срабатывания генератора

На настроечном кадре (рис. 4а) условно показано начальное положение проволочки.

Проверка регистратора в реальных экспериментах

Для проверки камеры в реальных условиях было решено изучить динамику разлета мишени на установке «ИСКРА-5» [4].

Суть проводимого опыта – выстрел лазером в полую сферическую минешь, как показано на рис. 5.

На рис. 5 представлен настроечный кадр камеры перед опытом, видны сфера и подвес.

Настройки камеры: задержка ~ 50 нс, период 250 нс, экспозиция 50 нс.

Полученные кадры разлета сферы представлены на рис. 6.

Измеренная скорость разлета мишени $V \sim 40$ км/с.



Рис. 5. Настроечный кадр, опыта со сферой



Рис. 6. Регистрация разлета сферы: 1 – 4 кадры регистрации

Заключение

Создан 4-х кадровый высокоскоростной электронно-оптический регистратор повышенного пространственного разрешения, со следующими характеристиками:

– диапазон спектральной чувствительности, нм
– от 400 до900;

 количество кадров за один цикл регистрации – 4;

пространственное разрешение (при поле зрения 3 мм), мкм – 20;

- время регистрации, мкс - от 0,4 до 500;

длительность экспозиции кадра, мкс – от 0,05 до 16;

- частота кадров, МГц – до 10;

регулируемая задержка запуска, мкс – от 0,2 до 150;

внутренний коэффициент усиления – от 1 до 1000;

динамический диапазон линейной регистрации – 2000;

 возможность индивидуальной настройки чувствительности кадров.

Литература

1. Душина Л. А., Корниенко Д. С., Кравченко А. Г. и др. Многокадровый оптический фотохронограф микросекундного диапазона СЭР-7 и методики регистрации быстропротекающих процессов на его основе // Сб. докладов 13 научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров 2015 г. С. 187–193.

2. Корниенко Д. С., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н., Мисько В. В., Рукавишников А. Н., Сеник А. В., Стародубцев К. В., Тараканов В. М., Чаунин А. Е. Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // Приборы и техника эксперимента. 2014, № 2. С.78–89.

3. Ананьев С. С., Казаков Е. Д., Шведов А. А. Беспараллаксная шестикадровая электронно-оптическая камера для исследований в области импульсного утс и других импульсных процессов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 2. С. 89–93.

4. Анненков В. И., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др. Перевод йодного лазера «ИСКРА-5» в режим работы на второй гармонике // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 11. С. 993–995.

ПРОХОЖДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПРИЗЕМНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

<u>Р. С. Кузин</u>, Е. Н. Макейкин, С. А. Анциферов, А. В. Авдошин, И. В. Гостев, А. Ю. Герасимов, В. Н. Михалкин, А. М. Радайкин, А. А. Шадрин

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

Введение

Значительные достижения квантовой электроники позволили создать уникальные по своим характеристикам лазерные системы, которые за счет облучения объекта лазерным излучением (ЛИ) и приема отраженного сигнала позволяют с достаточной точностью обнаружить, определить местонахождение, выполнить слежение и точное сопровождение удаленных объектов на требуемом расстоянии. Однако, несмотря на достигнутые успехи, проблемы эффективности работы таких систем лазерного видения (СЛВ) и вопросы повышения их дальности работы остаются актуальными. Наиболее остро стоят проблемы обеспечения максимально возможной всепогодной работы СЛВ и увеличения максимальной дальности видения.

Выделяют два основных фактора, влияющие на лазерный пучок при прохождении участка атмосферы — это турбулентность и явления поглощения и рассеяния на мельчайших частицах, содержащихся в атмосфере. Наличие таких явлений ограничивает предельную дальность работы систем лазерного видения, позволяющих регистрировать исследуемый объект на дальнем расстоянии. Общий принцип работы СЛВ представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий принцип работы системы лазерного видения

Лазер зондирует область атмосферы, как показано на рисунке. При наличии исследуемого объекта в области на достаточном расстоянии, фотоприемное устройство фиксирует диффузно-отраженный сигнал. Очевидно, что дальность работы такой системы зависит от коэффициента пропускания лазерного излучения атмосферой и от турбулентности. Рассмотрим их более подробно.

Метеорологическая оптическая дальность

Метеорологическая оптическая дальность (МОД) – расстояние, на котором лазерное излучение ослабляется до 5 % от своего первоначального значения. Данный параметр принят как основной показатель потерь лазерного излучения при прохождении атмосферной трассы.

В связи с тем, что не существует точной формулы, позволяющей вычислить полное пропускание атмосферы (из-за неоднородности частиц и других параметров, входящих в нее), была модернизирована методика измерения МОД, позволяющая получать экспериментальные значения коэффициента пропускания атмосферы на измерительной трассе в любое время дня и года. Ранее она была разработана Лавровым Л. М. и Горячевым Л. В [2].

Метеорологическая оптическая дальность $S_{\text{мод}}$ в зависимости от коэффициента пропускания и длины трассы т и L соответственно, выражается формулой [2]:

$$S_{\text{MOД}} = L \frac{\ln(0, 05)}{\ln(\tau)}.$$
 (1)

Ослабление лазерного пучка связано с рассеиванием и поглощением на мельчайших частицах, содержащихся в атмосфере. Рассмотрим более подробно эти явления.

Рассеяние

Основной вклад в рассеяние вносят мелкие частицы, находящиеся в нижних слоях атмосферы. В воздухе находятся пары воды, капли воды различных размеров, кристаллы льда и частицы пыли. Значительное скопление капелек воды в атмосфере образует дымку, туман и облака. Мельчайшие капли воды, а также частицы мелкой пыли имеют настолько малый вес, что находятся в атмосфере во взвешенном состоянии, не опускаясь на землю. Диаметр таких частиц составляет примерно 0,01–10 мкм. Более крупные капли воды и пыли диаметром 10–100 мкм оседают на землю, но весьма медленно и восходящими потоками воздуха часто вновь поднимаются вверх. Диаметр капель моросящего дождя составляет 100–500 мкм, а крупного дождя 0,5–5 мм. Капли дождя и кристаллы льда почти полностью рассеивают, а частицы пыли отчасти рассеивают и отчасти поглощают падающий на них свет [1].

Поглощение

Молекулярное поглощение вызвано наличием в атмосфере различных газов. Поглощение играет чрезвычайно важную роль в диапазоне волн 0,3–15 мкм, поскольку здесь сосредоточены наиболее сильные колебательно-вращательные полосы водяного пара и всех других газов. Основной поглощающий газ – водяной пар.

Наиболее сильно излучение поглощается трехатомными молекулами газов: парами воды, углекислым газом и озоном (при отсутствии техногенных примесей и в порядке уменьшения коэффициента поглощения). Озон сконцентрирован в высших слоях атмосферы, поэтому в приземном слое влиянием озона на поглощение можно пренебречь, будем рассматривать только влияние H_2O и CO_2 . Молекулярное поглощение имеет ярко выраженный селективный характер и проявляется в виде полос поглощения, разделенных областями пропускания, где поглощение либо вообще отсутствует, либо является весьма малым. Такие области спектра называются «окнами прозрачности» атмосферы.

Экспериментальная схема измерений МОД

Общая схема установки для измерения коэффициента пропускания представлена на рис. 2.

В качестве источника излучения использовались 4 различных генератора лазерного излучения на длинах волн 0,53; 0,63; 1,06; 1,07 мкм. Одновременно в установке использовалось 2 лазера. Плоскопараллельные зеркала 3-4 применялись для внедрения в установку дополнительного генератора лазерного излучения 1. Сферические зеркала 5 и 7 устанавливались в качестве телескопа для расширения пучка и фокусировки приходящего излучения. Делитель 10 необходим для направления доли лазерного пучка на фотоприемные устройства. Собирающие линзы 13 и 14 предназначены для фокусирования лазерных пучков на фоточувствительные площадки ФПУ.

Для минимизации фоновых засветок перед приемниками *11–12* устанавливались узкополосные интерференционные фильтры с рабочими длинами волны 0,53; 0,63; 1,06 и 1,07 мкм, в зависимости от длины волны генерирующего лазерного излучения.



Рис. 2. Общая схема установки для измерения коэффициента пропускания лазерного излучения: 1 – ГЛИ 1; 2 – ГЛИ 2; 3, 8–9 – плоские глухие зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 5–7 – сферические зеркала; 10 – клин; 11–12 – ФПУ; 13–14 – собирающие линзы

Измерение коэффициента пропускания трассы длиной *L* осуществлялось в 2 этапа. Сначала зеркало 8 устанавливается в правое положение для регистрации сигнала, выходящего после оптической схемы (см. рис. 2), при этом фотоприемное устройство 12 регистрирует отраженный сигнал K₁₂₋₀. ФПУ 11 регистрирует первоначальный сигнал К₁₁₋₀. Рассчитываем отношение полученных сигналов $K_0 = K_{12-0}/K_{11-0}$ и переходим ко второму этапу. Смещаем зеркало 8 в левое положение и выводим лазерный пучок на трассу. ФПУ-12 регистрирует от зеркала 9 обратно отраженный сигнал К₁₂₋₁, одновременно ФПУ-11 регистрирует исходный сигнал К₁₁₋₁. Аналогично $K_1 = K_{12-1}/K_{11-1}$. Отношение K_1/K_0 , является коэффициентом пропускания лазерного излучения т на трассе длиной L.

$$\tau = K_1 / K_0. \tag{2}$$

Одновременно с измерением пропускания и определением регистрировались время и дата измерений, а также основные параметры атмосферы: температура, влажность, наличие облаков и осадков. Температура и влажность воздуха измерялись с помощью беспроводной метеостанции Vantage Vue.

Расчет погрешностей

Относительная погрешность измерения электрического сигнала фотодиодов с помощью осциллографа Tektronix TDS3014 по нашей методике составляет:

$$\delta_{K_0} = \delta_{K_1} = \pm 3 \%.$$

Относительная погрешность измерения трассы длиной 400 м дальномером составляет $\delta_L = \pm 5$ %.

Исходя из соотношения (2) найдем относительную погрешность определения коэффициента пропускания трассы т:

$$\delta_{\tau_L} = \pm \frac{1}{K_1} \sqrt{\delta_{K_1}^2 + \tau \delta_{K_0}^2}, \qquad (3)$$

 $K_1 = 1,96$ – получено экспериментально.

Относительная ошибка измерений МОД $\delta_{S_{MOR}}$ определялась по формуле, вытекающей из соотношения (1):

$$\delta_{S_{MOR}} = \frac{\ln(0,05)}{\ln(\tau_L)} \sqrt{\delta_L^2 + L^2 \left(\frac{\delta_{\tau_L}}{\ln(\tau_L)\tau_L}\right)^2}.$$
 (4)

Экспериментальные результаты

С использованием методики измерений в различных погодных и сезонных условиях и в различное время суток проводились измерения пропускания лазерного излучения атмосферой на трассе длиной 400 м и определялось значение $S_{\rm MOZ}$. Всего было проведено более 500 измерений.

Экспериментально полученные средние значения МОД для исследуемых длин волн при различных погодных условиях с погрешностями, которые рассчитывались по формуле (4), представлены в таблице.

Из таблицы можно сделать следующие выводы:

 наибольшим пропусканием, из рассмотренных длин волн, обладают 1,06 и 1,07 мкм; с наступлением осадков любой интенсивности установка становится значительно точнее. Это связано с тем, что МОД уменьшается, и отношение длины измерительной базы к МОД становится выше, что приводит к уменьшению погрешности измерений;

 в случае отсутствия осадков или при наличии осадков небольшой интенсивности МОД для длины волны 1,06 мкм более чем в 2 раза выше, чем для 0,63 мкм;

 метеорологическая оптическая дальность для длины волны 0,53 мкм приблизительно в 2 раза меньше, чем для длины волны 1,06 и 1,07мкм. Однако сравнима с МОД для 0,63 мкм;

 с наступлением осадков небольшой интенсивности МОД снижается более чем в 2 раза, а при обильных осадках МОД уменьшается более чем в 10 раз в сравнении с ясной погодой;

 данная методика является высокоточной методикой измерения метеорологической оптической дальности на горизонтальной трассе в сравнении с аналогами.

МОД при ясной погоде для длины волны 1,06 мкм сравнима с МОД для 1,07 мкм и значительно выше, чем МОД для 0,53 и 0,63мкм.

В связи с этим можно сделать вывод, что для лазерного зондирования целесообразнее использовать генератор излучения с длиной волны 1,06 мкм или 1,07мкм. На этих длинах волн пропускание атмосферы, и, следовательно, МОД, существенно выше, чем при использовании лазеров на длине волны 0,53 или 0,63 мкм.

Анализ результатов, полученных с помощью данной методики, показал, что в нашей местности для исследованных длин волн, значения МОД равны:

 $S_{\text{мод0,532}} = 30$ км; $S_{\text{мод0,63}} = 24$ км; $S_{\text{мод1,06}} = 60$ км и $S_{\text{мод1,07}} = 64$ км – при ясной погоде.

 $S_{\text{мод}0,63} = 12$ км; $S_{\text{мод}1,06} = 17 - 30$ км – в случае выпадения осадков слабой интенсивности.

 $S_{\text{мод}0,63} = 3 - 7$ км; $S_{\text{мод}1,06} = 3 - 13$ км – в случае выпадения обильных осадков.

Сопоставление полученных результатов с литературными данными [2] показывает, что результаты согласуются между собой.

Средние значения МОД для исследуемых длин волн лазерного излучения при различных погодных условиях

Длина волны излучения, мкм	МОД, км. Ясная погода	МОД, км. Моросящий дождь	МОД, км. Дождь	МОД, км. Снег слабой интенсивности	МОД, км. Снег
0,532	30±9	—	—	—	—
0,63	24±5	12,1±1,3	$7,1{\pm}0,5$	12,0±1,3	$3,0{\pm}0,1$
1,06	60±22	29,5±8,6	13,0±1,8	17±2	3,0±0,1
1,07	64±25	_	_	_	_

Турбулентность

Солнечное излучение, поглощенное земной поверхностью, дает вклад в нагрев слоев воздуха в нижней атмосфере. Плотность воздуха принимает локальные значения, зависящие от температурных условий. Флуктуации плотности порождают конвекционное движение газа; этот процесс называется атмосферной турбулентностью [3].

При распространении лазерного излучения в турбулентной атмосфере происходит уширение и расщепление пучка, флуктуации направления и изменение распределения интенсивности в его сечении (амплитудные сцинтилляции).

Расширение коллимированного пучка с учетом его дифракционного расхождения и блуждания описывается выражением:

$$d_2 = 16d_0^2 + \frac{16L}{Kd_0^2} + 8,76C_n^2 l_0^{-1/3} L^3,$$
 (5)

где d_0 – начальный диаметр пучка, L – длина трассы, K – волновое число, C_n^2 – структурная постоянная, l_0 – внутренний масштаб турбулентности.

При распространении в приземной атмосфере узких и сфокусированных пучков излучения оптического квантового генератора (ОКГ) уширение их за счет турбулентности бывает столь значительным, что интенсивность на оси пучка может снизиться в 20 и более раз по сравнению с рассчитанной без учета влияния турбулентности. Снижение интенсивности в центре пучка сопровождается расширением диаграммы направленности пучка и усилением ореольного эффекта [2].

Результаты исследования структурной постоянной C_n в течение суток представлены на рис. 3 [3].



Рис.3. Результаты измерения структурной постоянной C_n в течение суток







Экспериментальная схема измерений

На рис. 4 представлена разработанная схема для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок.



Рис. 4. Общая схема установки для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок на горизонтальной трассе: 1, 3, 4, 6 – глухие зеркала; 2 – телескоп; 5 – сетчатый экран

Телескоп 2 предназначен для расширения лазерного пучка и фокусировки приходящего с трассы излучения на экране 5. Зеркало 4 применяется для вывода излучения на трассу, при этом зеркало 6 настраивается таким образом, чтобы пучок вернулся строго на экран 5. Излучение с трассы на экране 5 фиксируется с помощью видеокамеры 7 для дальнейшей обработки.

Для обработки экспериментов и автоматической регистрации кадров в любое время суток были написаны программы в среде разработки LabView, поэтому удалось получить более 3000 экспериментальных данных.

Экспериментальные результаты

На рис. 5 представлены наблюдаемые кадры на экране при характерных изменениях погоды. Измерения производились при неизменных параметрах оптической системы.

Рис.5. Влияние турбулентной атмосферы на диаметр лазерного пучка при различных погодных условиях: а – солнце, *d* = 8 см; б – затмение солнца тучами, *d* = 4 см; в – пасмурная погода, моросящий дождь, *d* = 1,25 см

Из рис. 5 видна сильная изменчивость влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок при изменении погодных условий.

По полученным экспериментальным данным построена зависимость диаметра сфокусированного пучка с горизонтальной трассы длиной 360 м на экране от времени суток в солнечный день. График зависимости представлен на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость диаметра сфокусированного пучка с трассы длиной 360 м на экране от времени суток в солнечный день

Из рис. 6 видно, что в солнечный день наибольшее влияние турбулентной атмосферы на распространение лазерного пучка соответствует периоду с 11 до 15 часов.

Во время проведения экспериментов были замечены мгновенные изменения диаметра регистрируемого пучка при затмении солнца тучами. По этой причине была снята зависимость диаметра пучка при ясной погоде от диаметра пучка в момент затмения солнца тучам. График зависимости представлен на рис. 7.



Рис. 7. Изменение диаметра сфокусированного пучка при затмении солнца тучами

Из рис. 7 следует вывод, что при затмении солнца тучами диаметр пучка уменьшается более чем в 1,5 раза.

Далее была собрана статистика изменения диаметра сфокусированного лазерного пучка в пасмурный день. График представлен на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что диаметр пучка в пасмурную погоду изменяется не более чем на 30 % от среднего значения в течение суток.



Рис. 8. Зависимость диаметра лазерного пучка от времени суток в пасмурный день

Выводы

В результате выполнения работы получены следующие основные результаты:

 доработана и адаптирована к условиям проведения наших экспериментов методика измерений коэффициента пропускания атмосферы;

 экспериментально измерены коэффициенты пропускания лазерного излучения атмосферой для нескольких длин волн и рассчитаны S_{мод} в различных метеорологических условиях;

- анализ полученных данных показал, что для лазерного зондирования целесообразнее использовать генератор излучения длиной волны 1,06 или 1,07 мкм;

- показано, что в течение времени наблюдений $S_{\rm MOZ}$ может меняться в достаточно широких пределах вследствие изменения погодных условий;

 разработана установка для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок на горизонтальной трассе;

- для автоматизации экспериментальных исследований на установке были написаны программы в среды программирования LabView. Это позволило получить значительно больше экспериментальных данных.

набрана статистика (более 3000 измерений)
влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок
в зависимости от погодных условий, температуры и
влажности;

 получены уникальные зависимости диаметра фокусирующегося лазерного пучка от погодных условий и времени суток;

 экспериментально показано, что в солнечный день наибольшее влияние турбулентной атмосферы на лазерный пучок соответствует времени с 11 до 15 часов;

 при затмении солнца тучами диаметр пучка уменьшается более чем в 1,5 раза.

- диаметр пучка в пасмурную погоду изменяется не более чем на 30 % от среднего значения. При этом влияние турбулентной атмосферы на распространение лазерного пучка не зависит от времени суток.

Литература

1. Зуев В. Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. Радио, 1966. 2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Оптика атмосферного аэрозоля. Т. 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1987.

3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: МИР, 1988.

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ РЕЖИМОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, ПРОВОДИМЫХ НА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ ТИПА БН

А. М. Анфимов, В. С. Горбунов, <u>Д. В. Кузнецов,</u> С. Л. Осипов

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Введение

Согласно требованиям нормативной документации при обосновании безопасности реакторных установок (РУ) типа БН должны рассматриваться аварии с обесточиванием энергоблока, характеризующиеся потерей принудительной циркуляции теплоносителя и, как следствие, нарушением теплоотвода от активной зоны реактора.

Специфической особенностью установок с реакторами типа БН с точки зрения безопасности аварийных режимов является большая номинальная теплонапряженность в активной зоне и теплообменном оборудовании. Это обусловливает относительно быстрый рост температуры натрия и твэлов при нарушениях режима циркуляции теплоносителя. В связи с этим при разработке и эксплуатации РУ типа БН особое внимание уделяется режимам с естественной циркуляцией (ЕЦ) теплоносителя.

В настоящее время на Белоярской атомной станции успешно работают первые промышленные установки с реакторами на быстрых нейтронах и натриевым теплоносителем БН-600 и БН-800. В АО «ГНЦ РФ – НИИАР» с 1969 г. эксплуатируется двухлетлевая трехконтурная экспериментальная установка БОР-60. Безаварийно отработала свой срок опытно-демонстрационная установка БН-350 (Казахстан).

Для подтверждения защитных свойств отечественных РУ типа БН в первые годы эксплуатации на каждой из них были выполнены исследования естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя в теплопередающих контурах. Среди зарубежных исследований, стоит отметить испытания на реакторе PHENIX (Франция) и экспериментальном реакторе EBR-II (США). Результаты выполненных испытаний на РУ типа БН подтверждают возможность существования устойчивой ЕЦ теплоносителя, необходимой для отвода остаточных тепловыделений от реактора.

Кроме того, данные, полученные во время испытаний на РУ, используются для верификации расчетных кодов, с помощью которых выполняется расчетное обоснование безопасности действующих и проектируемых в России РУ типа БН.

Особый интерес представляет верификация интегральных расчетных кодов нового поколения СОКРАТ-БН [1] и ЕВКЛИД [2], которые разрабатывают в рамках проектного направления «Прорыв». Коды нового поколения позволяют моделировать основные процессы и явления, протекающие в контурах РУ БН, помещениях энергоблока и окружающей среде в переходных и аварийных режимах, включая тяжелые аварии с плавлением топлива в активной зоне.

Экспериментальные исследования режимов с ЕЦ теплоносителя на экспериментальных установках БН

Одни из первых эксперименты с ЕЦ натриевого теплоносителя проводились на отечественной установке БР-5 [3]. БР-5 – трехконтурная двухпетлевая установка тепловой мощностью 5 MBт. В параллельных петлях (мощностью 2,5 МВт каждая) в качестве теплоносителя первого контура использовался натрий; в качестве теплоносителя промежуточного контура – натрий-калиевый эвтектический сплав. Далее тепло с одной из петель передавалось воздуху через воздушный теплообменник (ВТО), а со второй в парогенераторе (ПГ) воде и пару. Аварийное расхолаживание во время испытаний реактора в первые минуты после отключения системного электроснабжения обеспечивалось циркуляцией натрия насосом первого контура, запитанным от сети надежного электроснабжения. После нескольких минут принудительной циркуляции натрия насос первого контура был остановлен, и дальнейшее расхолаживание реактора производилось за счет ЕЦ по всем контурам через воздушный теплообменник (ВТО). Испытания проводились на различных уровнях мощности реактора и показали, что при ограничении подогрева натрия в реакторе до 200 °С (ограничение связано с температурными расширениями ТВС) воздушная петля обеспечивает надежный теплосъем с использованием ЕЦ до уровня мощности 250 кВт, что в полной мере обеспечивает съем остаточного тепловыделения в реакторе через несколько минут после его остановки. Также было показано, что при выбранной на этапе проектирования геометрии и, как следствие, гидравлики контуров теплоносителей не происходит колебаний и опрокидывания расхода в нестационарных режимах с ЕЦ теплоносителей.

Опыт проектирования и эксплуатации БР-5 лег в основу проектирования другой экспериментальной установки – БОР-60. Отвод тепла от активной зоны реактора производится натрием первого контура двумя параллельными петлями (по 30 МВт каждая) через натриевый промежуточный контур к парогенератору. Также в установке имеется воздушный теплообменник, рассчитанный на отвод тепловой мощности 30 МВт, с возможностью подключения к любой из петель вместо соответствующего парогенератора или одновременно на две петли [4]. Воздух, нагретый в ВТО, сбрасывается спецвентиляторами в вытяжную трубу, которая также обеспечивает естественную тягу воздуха в условиях аварийного расхолаживания. Останов реактора возможен путем срабатывания медленной аварийной защиты (МАЗ) и быстрой аварийной защиты (БАЗ). В первом случае все стержни системы управления и защиты (аварийной защиты – АЗ, регулирующие – РС и компенсирующие – КС), кроме центрального КС, вводятся в а.з. за 40 с.

Во втором случае центральный КС остается в прежнем положении, периферийный КС и стержни АЗ вводятся в а.з. за 1 с. РС вводятся за 40 с.

На установке БОР-60 была проведена большая серия экспериментов по срабатыванию БАЗ и МАЗ реактора на различных уровнях мощности с отключением циркуляционных насосов. Как видно из рис. 1а, отношение относительной мощности РУ к относительному расходу через активную зону при срабатывании БАЗ всегда меньше 1, что говорит об устойчивом расхолаживании реактора. При срабатывании МАЗ характер уменьшения расхода близок к характеру изменения мощности реактора на протяжении ~70 с после начала режима. Изменение подогревов натрия первого контура при расхолаживании после срабатывания МАЗ с уровня мощности 20 МВт представлено на рис. 16, откуда видно, что после остановки насосов и установления режима ЕЦ в контуре реактор переходит в режим устойчивого расхолаживания.

Исследование влияния отношения расхода натрия во втором контуре к расходу в первом показали, что при увеличении этого отношения величина пика температур на выходе из активной зоны уменьшается. Данное обстоятельство объясняется смещением центра теплосъема в промежуточном теплообменнике (ПТО) вверх, где создаются лучшие условия для формирования движущего напора ЕЦ.

Для исключения температурных скачков на трубных досках ПГ в режимах аварийного останова подбирался режим уменьшения расхода питательной воды. В результате исследований определили, что наиболее спокойным для ПГ является снижение расхода питательной воды за 60 с с момента прохождения сигнала на аварийную остановку.

По результатам проведенных экспериментов было решено любую аварийную остановку и перегрузку топлива на БОР-60 проводить с переходом на ЕЦ теплоносителя.



Рис. 1. Изменение мощности и параметров натрия первого контура БОР-60 при срабатывании аварийной защиты и расхолаживании на ЕЦ [4]: а – мощности: 1 – мощность при БАЗ; 2 – мощность при МАЗ; 3 – расход натрия первого контура; б – параметры: 1 – подогрев натрия на входе в а.з., 2 – подогрев натрия на выходе из а.з.

Расчетно-экспериментальные исследования режимов с ЕЦ теплоносителя на зарубежных установках БН

Среди зарубежных РУ типа БН стоит отметить французскую установку PHENIX, на которой был выполнен комплекс исследований режимов с ЕЦ теплоносителей. PHENIX – трехконтурная трехпетлевая установка с натриевым теплоносителем тепловой мощностью 563 МВт. Исследования возможности расхолаживания реактора с помощью ЕЦ были проведены 22-23 июня 2009 года [5]. Перед началом эксперимента реактор работал на мощности 350 МВт в течение 6 дней, а затем в течение одного дня мощность была снижена до 120 МВт. Перед началом эксперимента РУ работала на двух петлях. Исходное событие для моделирования режима – прекращение подачи питательной воды в ПГ. Вследствие осушения парогенераторов произошел рост температуры на входе в ПТО второго контура и, как следствие, рост температуры на входе в активную зону. Рост температуры в активной зоне вызвал некоторое снижение нейтронной мощности за счет обратных связей по реактивности. После достижения предельной разницы температур между первым и вторым контуром сработала аварийная защита реактора. После этого отключились циркуляционные насосы первого контура. Скорость насосов второго контура снизилась и зафиксировалась на уровне 110 об/мин. В этот момент времени развилась естественная циркуляция в первом контуре. Сток тепла в эксперименте происходил с оборудования и трубопроводов второго контура и с корпуса и крыши реактора. Спустя три часа, после открытия боксов ПГ, дополнительное охлаждение обеспечивалось за счет охлаждения корпусов ПГ воздухом. По экспериментальной оценке установившийся уровень расхода ЕЦ через а.з. реактора (рис. 2а) находился в интервале 0,01-0,02 отн. ед., что обеспечило устойчивое расхолаживание РУ.

Также испытания по ЕЦ натрия были проведены на экспериментальном быстром реакторе EBR-II (США). EBR-II – установка с интегральной компоновкой реактора мощностью 62,5 МВт. Среди испытаний по исследованию ЕЦ стоит отметить эксперимент SHRT-17, использующийся в качестве бенчмарка для верификации расчетных кодов [6]. Перед началом испытаний реактор работал на номинальной мощности в течение двух часов. Исходное событие в данном эксперименте – останов насосов первого и второго контуров. Расход ЕЦ натрия первого контура установился на уровне ~0,013 отн. ед., что обеспечило спад температур натрия первого контура в реакторе (рис. 2б).

Данные режимы использовались для верификации кода нового поколения СОКРАТ-БН [5, 6]. Проведенные расчетные исследования подтвердили адекватность моделирования кодом процессов отвода остаточных тепловыделений на ЕЦ теплоносителя, а среднее относительное отклонение расчета от эксперимента составило ~17 % по отношению к максимальному изменению температур в ходе режима (рис. 2).



Рис. 2. Изменение параметров натрия первого контура в реакторах при испытании с ЕЦ в сравнении с результатами расчетов по коду СОКРАТ-БН [5, 6]: а – реактор PHENIX, б – реактор EBR-I: 1 – расход натрия первого контура – *СОКРАТ-БН*, — — — эксперимент; 2 - температура натрия на входе в ПТО – СОКРАТ-БН, □ – эксперимент; 3 – температура натрия на выходе из ПТО – СОКРАТ-БН, ○ – эксперимент

Расчетно-экспериментальные исследования режимов с ЕЦ теплоносителя на отечественных промышленных установках БН

Говоря об опыте проектирования отечественных установок типа БН, нельзя обойти стороной опытнодемонстрационную установку БН-350, работавшую в Казахстане. БН-350 – трехконтурная РУ петлевой компоновки с шестью петлями теплоотвода (одна петля – резервная) проектной тепловой мощностью 1000 МВт (максимальная достигнутая мощность составила 750 МВт). Кроме выработки электроэнергии БН-350 служила для опреснения воды.

Эксперименты с ЕЦ натрия в первом и втором контурах РУ БН-350 проводились в режиме подъема и снижения мощности, а также при останове реактора с различных уровней мощности [7]. Данные исследования показали, что в первом контуре после выбега циркуляционных насосов развивается прямой расход ЕЦ, а во втором контуре наблюдается опрокидывание расхода вследствие неблагоприятного распределения температуры натрия по контуру.

Также на РУ БН-350 были проведены исследования возможности развития локальной ЕЦ натрия во втором контуре [8]. В ходе испытаний была подтверждена возможность развития локальной ЕЦ теплоносителя второго контура (в горизонтальных и вертикальных участках контура), обес печивающей отвод остаточных тепловыделений от реактора за счет стока тепла через оборудование и трубопроводы второго контура.

Отечественная РУ следующего поколения – БН-600 – в отличие от БН-350 имеет баковую компоновку: оборудование первого контура, исключая некоторые вспомогательные системы, находится в едином корпусе. Номинальная тепловая мощность реактора – 1470 МВт. Передача тепла от реактора к ПГ осуществляется по трехконтурной схеме по трем параллельным петлям.

Экспериментальные исследования ЕЦ натрия на БН-600 проводились как одновременно в первом и втором контурах, так и в отдельности [9]. В первых экспериментах (на малых уровнях – до 3 % от номинальной мощности) изучалось влияние исходных параметров установки и дальнейшего режима их регулирования на возникновение и развитие ЕЦ. Для этого спад мощности остаточных тепловыделений моделировался с помощью стержней автоматического регулирования. Регулирование расхода питательной воды в ПГ во всех режимах осуществлялось дистанционно оператором. Данные эксперименты показали, что в первом контуре развивается устойчивая ЕЦ теплоносителя, которая не зависит от исходного состояния системы. На развитие ЕЦ во втором контуре существенно влияет наличие отвода тепла от контура и качество регулирования температуры натрия на выходе из ПГ (за счет обеспечения требуемого расхода питательной воды в ПГ).

В последующем были проведены два эксперимента по исследованию эффективности расхолаживания РУ БН-600 с помощью ЕЦ в первом и втором контурах с энергетических уровней мощности: с 19 и 50 % от номинальной мощности. В первом случае снижение нейтронной мощности в режиме срабатывания БАЗ и уровень остаточных тепловыделений моделировались одним из стержней АЗ и РС. Через 2 с после введения в а.з. стержня АЗ отключились циркуляционные насосы в первом и втором контурах. Расходы ЕЦ по первому и второму контурам в данном режиме составили ~0,03 и 0,06 отн. ед. Данный эксперимент показал, что для получения наиболее благоприятных условий поддержания ЕЦ во втором контуре необходимо как можно дольше удерживать паровой режим работы ПГ путем уменьшения в нем давления со стороны третьего контура.

При расхолаживании с 50 % номинальной мощности исходные подогревы теплоносителей первого и второго контуров были близки к номинальным значениям (150 и 140 °C, соответственно). Исходное событие для начала режима – обесточивание установки. Однако в отличие от штатного алгоритма при обесточивании циркуляционные насосы не переводились на пониженные обороты, а сразу останавливались по кривой естественного механического выбега. Установившиеся расходы ЕЦ в первом и втором контурах составили ~0,02 и 0,07 отн. ед., соответственно.

Данные эксперименты показали, что при большом исходном подогреве теплоносителя второго контура, характерном для энергетических уровней мощности реактора, во втором контуре РУ развивается устойчивая ЕЦ.

На режимах по исследованию ЕЦ теплоносителей в РУ БН-600 была проведена верификация расчетных кодов СОКРАТ-БН [9] и ЕВКЛИД [10]. Результаты расчета динамических режимов расхолаживания установки БН-600 кодом ЕВКЛИД в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 3, откуда видно, что расчетные значения основных параметров РУ хорошо совпадают с экспериментальными данными. При этом среднеинтегральные относительные отклонения расчета от эксперимента составили 10 % по температурам натрия в контурах и 20 % по расходу теплоносителя второго контура.

В 2016 году завершился ввод в эксплуатацию энергоблока №4 Белоярской атомной станции с РУ БН-800. Номинальная тепловая мощность реактора составляет 2100 МВт. Теплоотвод от реактора организован по трехконтурной схеме тремя параллельными петлями. На этапах энергопуска и опытнопромышленной эксплуатации на энергоблоке была выполнена серия экспериментов по исследованию развития ЕЦ в натриевых контурах. Отвод остаточных тепловыделений от реактора осуществлялся системой аварийного расхолаживания (САРХ) через промежуточный натриевый контур к ВТО. Натрий промежуточного контура охлаждается атмосферным воздухом, проходя внутри трубок ВТО. Нагретый в ВТО воздух за счет естественной тяги сбрасывается в венттрубу САРХ.

Эксперименты по исследованию ЕЦ проводились на различных исходных уровнях мощности реактора одновременно в первом и втором контурах, а также по отдельности. Возникновение ЕЦ теплоносителей в первом контуре РУ определялось в режимах по характеру изменения температур натрия на выходе из а.з., входе и выходе ПТО по первому контуру, так как в первом контуре отсутствует возможность прямого определения расхода теплоносителя.

Испытания ЕЦ теплоносителей, проводимые на исходных уровнях мощности менее 50%, показали возможность развития устойчивой ЕЦ теплоносителя в первом контуре при принудительной циркуляции натрия в контуре CAPX, а также возможность существования ЕЦ натрия в контуре CAPX при принудительной циркуляции теплоносителя в первом контуре.

Наиболее интересным с точки зрения обоснования безопасности РУ БН-800 является режим по исследованию развития ЕЦ в первом и втором контуре, проводимый с исходного уровня мощности 50 % от номинального. Исходное событие для формирования сигнала на останов реактора – уменьшение расхода питательной воды. После срабатывания АЗ отвод тепла от реактора осуществлялся введенной в работу САРХ. Отключение циркуляционных насосов первого контура произвели спустя час после исходного события. Максимальный прирост температуры натрия на выходе из а.з. составил при этом ~65 °C. После установления в первом контуре реактора расхода ЕЦ (~0.03 отн. ед.) и наступления устойчивого процесса расхолаживания спустя ~40 мин после отключения циркуляционных насосов первого контура были отключены электромагнитные насосы САРХ. Расход в промконтуре САРХ составлял при этом 0,4-0,6 отн. ед. Таким образом, ЕЦ установилась во всех натриевых контурах, обеспечивая отвод остаточных тепловы делений от а.з. реактора через промконтур САРХ в ВТО, где тепло передавалось атмо-



a

сферному воздуху за счет его естественной конвекции через межтрубное пространство ВТО.

В 2017 году были проведены поверочные расчеты режимов, проводимых на этапах ввода в эксплуатацию энергоблока РУ БН-800, с использованием теплогидравлического модуля кода ЕВКЛИД [11]. Сравнительный анализ расчета режима расхолаживания реактора БН-800 с 50 % от номинальной мощности (рис. 4) на ЕЦ в первом и втором контуре показал, что результаты расчета по коду ЕВКЛИД основных теплогидравлических параметров РУ попадают в область погрешности их определения в эксперименте (температуры теплоносителей нормированы на исходные уровни температур перед началом эксперимента).



Рис. 3. Изменения параметров натрия первого контура РУ БН-600 в режиме с расхолаживанием реактора с уровня мощности 50 % от номинального в сравнении с результатами расчета по коду ЕВКЛИД [10]: 1 – расход натрия через а.з. – ЕВКЛИД, — • — • – эксперимент; 2 – температура натрия на входе в ПТО – ЕВКЛИД, □ – эксперимент; 3 – температура натрия на выходе из ПТО – ЕВКЛИД, ∘ – эксперимент



Рис. 4. Изменение параметров РУ БН-800 в ходе режима расхолаживания на ЕЦ с 50 % номинальной мощности в сравнении с расчетами по коду ЕВКЛИД [11]: а – активная зона: 1 – расход натрия через а.з. – ЕВКЛИД, — • — – эксперимент; 2 – температура натрия на выходе из а.з. – ЕВКЛИД, ○ – эксперимент; б – ВТО: 1 – расход натрия через ВТО – ЕВКЛИД, • – эксперимент 2 – температура натрия на входе в ВТО – ЕВКЛИД, □ – эксперимент, 3 – температура натрия на выходе из ВТО – ЕВКЛИД, ∇ – эксперимент

Расчетные исследования ЕЦ в инновационном проекте РУ типа БН большой мощности

В инновационном проекте РУ типа БН для расхолаживания реактора используется система аварийного отвода тепла (САОТ) [12], которая обеспечивает передачу тепла от теплоносителя первого контура через промежуточный натриевый контур и ВТО атмосферному воздуху. САОТ используется для отвода тепла от реактора в режимах нормальной эксплуатации, при нарушениях нормальной эксплуатации и авариях, включая аварии с полной потерей принудительного теплоотвода через третий контур.

Передача тепла от первого контура в промежуточный осуществляется с помощью автономных теплообменников (АТО). В режимах расхолаживания натрий поступает из горячей камеры реактора в АТО и, отдавая тепло натрию промконтура, по напорным трубопроводам АТО подается в напорную камеру реактора.

Открытие выходных шиберов ВТО в режимах нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации осуществляется активным способом. При авариях открытие части выходных шиберов происходит пассивным способом.

Результаты расчетов аварии с полной потерей электроснабжения по коду СОКРАТ-БН показали, что в процессе выбега циркуляционных насосов первого контура происходит срабатывание пассивных стержней АЗ и пассивных секций выходных шиберов ВТО. Это приводит к останову реактора и пассивному вводу в действие САОТ. Как видно из рис. 5 в процессе расхолаживания в реакторе и контурах САОТ развивается устойчивая естественная циркуляция теплоносителя на уровне 0,02 – 0,03 отн. ед.



Рис. 5. Изменение основных параметров инновационной РУ типа БН в ходе аварии с полной потерей электроснабжения [12]: 1 – мощность реактора (N); 2 – расход теплоносителя через а.з. (G_I); 3 – расход теплоносителя в промежуточном контуре САОТ (G_{Na}); 4 – расход теплоносителя в воздушном контуре САОТ (G_{AIR}); 5 – отношение температуры оболочки твэл к предельно допустимому значению (T_{clad}/[T_{clad}]); 6 – отношение температуры корпуса реактора к предельно допустимому значению (T_{shell}/[T_{shell}])

При этом температура оболочек максимально напряженных твэл кратковременно достигает значений, близких к пределу безопасной эксплуатации. Температура корпуса реактора существенно ниже предела безопасной эксплуатации.

Заключение

Эксперименты, проводимые на реакторных установках БН, подтвердили, что режимы ЕЦ натриевого теплоносителя устойчивы, совпадают с направлением принудительной циркуляции. При этом расходы ЕЦ в натриевых контурах составляют порядка 0,01–0,07 от номинальных значений расходов, что обеспечивает отвод остаточного тепловыделения от а.з. реактора. На уровень расхода ЕЦ в РУ БН влияет распределение температур в контурах РУ, что в основном определяется уровнем исходной мощности реактора.

Результаты реакторных экспериментов с ЕЦ теплоносителей на установках БН-600, БН-800 и зарубежных установках PHENIX и EBR-II использовались при верификации кодов нового поколения (СОКРАТ-БН и ЕВКЛИД). В результате верификации была подтверждена адекватность моделирования кодами основных процессов и явлений, происходящих в РУ БН в аварийных режимах с потерей принудительной циркуляции теплоносителей.

Успешные результаты испытаний на отечественных РУ БН легли в основу разработки САОТ инновационного проекта РУ типа БН. Особенность системы САОТ для инновационного проекта РУ типа БН заключается в том, что ее ввод в действие и функционирование может осуществляться на пассивных принципах. Пассивность функционирования обеспечивается за счет развития устойчивой ЕЦ теплоносителей в контурах САОТ. Результаты расчетов переходных и аварийных режимов выполненные по коду СОКРАТ-БН, показали, что в процессе расхолаживания РУ на ЕЦ все принятые для инновационной энергетики критерии безопасности выполняются.

Литература

1. SOCRAT-BN integral code for safety analyses of NPP with sodium cooled fast reactors: development and plant application (ID: CN245-281) / R. V. Chalyy, N. A. Rtishchev, A.E. Tarasov et al // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), Yekaterinburg, Russia, 26-29 June 2017.

2. Avvakumov A. V., Alipchenkov V. M., Belov A. A., Bereznev V. P., Boldyrev A. V., Grushin N. A., Khanbikov I. N., Klimonov I. A., Kolobaeva P. V., Koltashev D. A., Mosunova N. A., Ozrin V. D., Rtishchev N. A., Seleznev E. F., Semenova M. M., Stakhanova A. A., Strizhov V. F., Tarasov V. I., Usov E. V., Veprev D. P., Veretentsev V. A., Afremov D. A., Kudryavtsev A. V., Semchenkov A. A., Osipov S. L., Anfimov A. M., Gorbunov V. S. Coupled calculations for the fast reactors safety justification with the EUCLID/V1 integrated computer code // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. FR17, 26-29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, IAEA-CN245-184. P. 10.

3. Багдасаров Ю. С. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1969.

4. Казачковский О. Д., Антипин Г. К., Афанасьев В. А., Бай В. Ф., Борисюк В. А., Борисюк Е. В., Грязев В. М., Ефимов В. Н., Кевролев В. П., Кондратьев В. И., Краснояров Н. В., Смирнов А. М. Аварийное расхолаживание установки БОР-60. «Атомная энергия», Т. 34, Вып. 5

5. Анфимов А. М., Ртищев Н. А., Семенов В. Н., Тарасов А. Е., Чалый Р. В. Верификация кода СОКРАТ-БН на экспериментальных данных, полученных на РУ Рhenix в режиме расхолаживания на естественной циркуляции – Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». 25–26 ноября 2015 г. НИКИЭТ. г. Москва

6. Rtishchev N., Ohira H., Sumner T., Monti S., Kriventsev V., Hu W., Sui D., Su G., Maas L., Vezzoni B., Sarathy U. P., Del Nevo A., Zanino R., Petruzzi A., Van Rooijen W. F. G., Morita K., Choi C., Shin A., Stempniewicz M., Zhang Y., Bates E., Final Results and Lessons Learned from EBR-II SHRT-17 Benchmark Simulations // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. FR17, 26–29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, IAEA-CN245-084

7. Ашурко Ю. М., Багдасаров Ю. Е., Кузнецов И. А., Букша Ю. К., Демин А. А., Купный В. И., Антуфьев О. Н., Козубов Э. П., Шейнкман А. Г., Левитин В. А. Основные результаты специальных экспериментов по исследованию систем и устройств аварийной защиты реакторов БН-350 и БН-600 // Франко-советский семинар по безопасности быстрых реакторов. Обнинск, 1985 г.

8. Ашурко Ю. М. Методы обоснования и оптимизации основных характеристик систем отвода остаточного тепловыделения в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Обнинск. 2003 г.

9. Rtishchev N. A., Chalyy R. V., Semenov V. N., Fokin A. M., Tarasov A. E., Shepelev S. F., Osipov S. L., Gorbunov V. S., Anfimov A. M. Validation of SOCRAT-BN Code on the Base of Reactor Experiments – 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS10), Okinawa, Japan, 14-18 Dec. 2014

10. Климонов И. А., Иванов Е. Н., Усов Э. В., Кудашов И. Г., Дугаров Г. А., Бутов А. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Анфимов А. М., Горбунов В. С., Кузнецов Д. В., Осипов С. Л., Бельтюков А. И. Верификация теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на основе экспериментов, выполненных на реакторной установке БН-600 // Атомная энергия. 2017. Т/ 122. № 5. С. 258–262.

11. Анфимов А. М., Кирилов И. Н., Кузнецов Д. В. Результаты анализа теплоотводной аварии РУ БН-800 с учетом данных, полученных на этапе ввода в эксплуатацию // Сб. докладов 20-й Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам 11–12 апреля 2018 года – г. Подольск, 2018. С. 118–126.

12. Using the SOCRAT-BN code to validate the BN-1200 design / A. M. Anfimov, D. V. Kuznetsov, I. N. Kirilov, R. V. Chalyy, N. I. Ryzhov, V. N. Semyonov, A. L. Fokin // Collection of papers of V International Scientific and Technical Conference – Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power, 2–5 October – Moscow, 2018. P. 810–819.

НАНОСЕКУНДНЫЕ МИКРОРАЗРЯДЫ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

<u>В. А. Любимцева</u>, А. Е. Дубинов

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

Разработаны, изготовлены и исследованы многослойные структуры, в которых генерируются наносекундные приповерхностные микроразряды. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и плазменный канал разряда формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Были получены изображения микроразрядов, подтвердившие, что их плазменные каналы формируются по заданному с помощью отверстий маршруту. При этом маршрут может проходить по достаточно сложной схеме, иметь точки самопересечения и участки, в которых электроны обязаны двигаться против электрического поля. При изучении формы каналов в многослойных структурах обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию.

Введение

Новая важная тенденция в развитии физики и техники электрических разрядов высокого давления наблюдается в последние годы. Она заключается в уменьшении продольных размеров разрядов до микронных и даже меньших размеров. Можно утверждать, что фактически уже сформировалось новое направление – физика и техника микроразрядов [1–4]. У казанная тенденция отражена, например, в программной статье «Плазменная дорожная карта 2012» [5].

Известные устройства генерации микроразрядов различаются по конструкции и принципу действия. Так, в обзоре [1] рассмотрены устройства на основе прямоточных искровых разрядов, разрядов с полым микрокатодом, диэлектрических барьерных разрядов, коронных микроразрядов, емкостных и индукционных ВЧ-разрядов, а также электродных СВЧ-разрядов. В другом обзоре [2] вместе с перечисленными выше рассматриваются также устройства на основе прямоточных поверхностных разрядов. Хорошо известно, что поверхностные разряды требуют меньших напряжений для зажигания, чем объемные разряды, они удобны для исследования и визуализации.

Примеры устройств генерации поверхностных микроразрядов различного назначения представлены

в работах [2, 6–9]. Описанные там устройства были выполнены в виде чипов, в которых электроды изготавливались путем осаждения паров металлов (Сu, Au, и др.) через трафарет на стеклянную, пластиковую или керамическую подложку. Понятно, что процесс изготовления подобных чипов может занимать несколько дней и является весьма трудоемким и затратным. Кроме того, в чипах имеется еще один недостаток: в них исключена возможность регулирования размеров и формы межэлектродного промежутка.

В недавних работах [10–12] описаны простые в изготовлении и недорогие устройства для генерации микроразрядов вдоль поверхности бумаги. Процесс изготовления электродов на поверхности бумаги заключается в нанесении проводящей краски по заданному рисунку электродов. Несмотря на простоту их изготовления, эти устройства имеют некоторое неудобство в работе: они позволяют осуществлять подсветку обрабатываемых плазмой образцов и визуализацию плазмы только с одной стороны, так как бумага непрозрачна.

В работах нашей группы [13–16] разработана техника простых и недорогих устройств для изучения поверхностных наносекундных микроискр. Эти устройства сделаны на поверхности стандартного предметного стекла и имеют электроды, вырезанные из алюминиевой фольги.

В данной работе в развитии этой техники были разработаны, изготовлены и исследованы многослойные разрядные структуры, в которых генерируются приповерхностные наносекундные микроразряды. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и канал разряд формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Развитая техника позволяет наблюдать каналы микроразрядов одновременно во всех слоях с обеих сторон.

При изучении наносекундных разрядов в описанных здесь структурах был обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию. Этот эффект представляется нами как некоторое трехмерное обобщение ориентирования плазменных каналов, ранее наблюдавшегося в двумерных лабиринтах [17, 18].

Экспериментальное оборудование

Для генерирования микроразрядов так же, как и в работах [13–16], в качестве генератора использовалась бытовая искровая пьезоэлектрическая зажигалка JZDD-17-R. Генератор выполнен в удобной для оператора форме пистолета (рис. 1). Он имеет коаксиальный выход. Было измерено, что, например, при межэлектродном расстоянии ~1 мм генератор выдает высоковольтные импульсы с длительностью 50 нс, амплитудой холостого хода ~2,5 кВ, ток разряда имеет амплитуду ~10–40 А на различных нагрузках, а электрическая энергия разряда < 0,5 мДж. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы импульса напряжения и тока разряда.



Рис. 1. Генератор наносекундных импульсов JZDD-17-R



Рис. 2. Типичные осциллограммы: а – напряжения, б – тока разряда, формируемые генератором JZDD-17-R

Для невооруженного глаза наносекундные микроразряды видны как мгновенные точечные искры. Для детальной визуализации каналов микроразрядов использовался оптический микроскоп Levenhuk D50L NG, оснащенный цифровой видеокамерой DEM200. Максимальное увеличение оптической системы микроскопа составляет 640×, а с дополнительной линзой Барлоу (Barlow) – 1280×. Получаемые изображения имеют высокое разрешение 1600×1200 пикселей.

Генератор импульсов и видеокамера микроскопа не имеют взаимной синхронизации, поэтому регистрация разряда велась в режиме видео с частотой кадров ≤ 7 кадров/с.

Для создания многослойных разрядных структур нам понадобилось несколько тонких и прозрачных диэлектрических пленок, в каждой из которых находилось бы по одному микроотверстию.

В качестве материала была выбрана полиэтиленовая пленка толщиной 10 мкм.

Для изготовления отверстия в каждой такой пленке была изготовлена вспомогательная разрядная ячейка. Она собиралась следующим образом. Сначала на поверхности стандартного предметного стекла с размерами сторон 1"×3" и толщиной 1 мм размещался электрод, вырезанный из алюминиевой фольги толщиной 14 мкм обычными бытовыми ножницами в форме клина с углом ~500. Этот электрод, как правило, служил анодом. Затем прикладывалась полиэтиленовая пленка с размерами, меньшими размеров стекла. После этого к пленке прикладывался другой клиновидный электрод из алюминиевой фольги так, чтобы расстояние между вершинами электродов было равно 200-400 мкм. И, наконец, все это покрывалось еще одним предметным стеклом. Получившийся таким образом сэндвич плотно обжимался и обвязывался скотчем.

На электроды, находящиеся вдоль разных поверхностей пленки, подавался один или несколько импульсов от генератора JZDD-17-R. При этом разрядная ячейка находилась в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. После одного импульса в пленке возникал электрический пробой. В результате пробоя в пленке образовывалось круглое микроотверстие диаметром ~30 мкм. Положение микроотверстия – случайное, где-то между катодом и анодом. Последующие импульсы лишь увеличивали диаметр микроотверстия и не приводили к возникновению других отверстий.

На рис. 3 а–3в показан процесс возникновения круглого микроотверстия в пленке в результате электрического пробоя.



а

Рис. 3. Процесс возникновения круглого микроотверстия в полиэтиленовой пленке: а – исходное состояние пленки до разряда (подсветка пленки снизу включена, видна зернистая структура полиэтилена); б – пробой пленки электрическим разрядом (съемка в темноте); в – конечное состояние пленки после разряда с микроотверстием (подсветка пленки снизу включена, внизу – увеличенный вырезанный фрагмент); на всех фото – катод слева, отрезок в левом нижнем углу – 100 мкм.

б

Экспериментальные результаты

Переходим к описанию основных результатов данной работы по формирования разрядов в многослойных структурах в форме *N*-звенных ломаных. Для этого изготовлялись многослойные структуры так же, как и в предыдущем случае при изготовлении отверстий.

Последовательность действий показана на рис. 4. Сначала на поверхности предметного стекла размещался электрод, выполненный из алюминиевой фольги. Затем прикладывалось (*N*–1) полиэтиленовые пленки с заранее изготовленными микроотверстиями так, чтобы эти микроотверстия определяли заданный *N*-звенный маршрут канала разряда. После этого к верхней пленке прикладывался другой клиновидный электрод из алюминиевой фольги. И, наконец, все это покрывалось еще одним предметным стеклом. Получившийся таким образом сэндвич плотно обжимался и плотно обвязывался скотчем.

Укажем, что все описанные здесь структуры недороги, так как в них использованы бытовые материалы. Цена генератора JZDD-17-R не превышает \$2. Каждая ячейка изготовлялась в течение нескольких минут вручную без каких-либо механических манипуляторов и механизмов.



в

Рис. 4. Последовательность изготовления многослойной разрядной структуры.

На рис. 5а–5е мы приводим в качестве примера шесть схем различных маршрутов (слева) и соответствующие им шесть изображений каналов (справа) однократных наносекундных поверхностных микроразрядов. Эти изображения получены в темноте, в воздухе при атмосферном давлении и при комнатной температуре. На рис. 5а показан разряд с *V*-образным каналом, полученный согласно самой простой схеме — с одной пленкой.

На рис. 5б показан разряд с *Z*-образным каналом, полученный с помощью двух пленок. Канал формируется таким образом, что электроны в нем двигаются не по электрическому полю от катода к аноду, а по другому маршруту – сначала к микроотверстию #1 в первой пленке, затем, пройдя через это микроотверстие, к микроотверстию #2 во второй пленке, и уж потом – к аноду. В [17] обнаружено, что разряд может формироваться так, что на определенном участке стример может двигаться перпендикулярен электрическому полю. Здесь же мы видим, что формирование *Z*-образного канала на среднем звене может быть направлено почти против направления на анод.

На рис. 5в показан разряд с X – образным каналом, полученный также с помощью двух пленок. Канал разряда здесь имеет средний участок, направленный против поля. Кроме этого, канал разряда имеет одну точку самопересечения.

На рис. 5г показан разряд с *W*-образным каналом, полученный с помощью трех пленок.

На рис. 5д показан разряд с звездно-образным каналом, полученный также с помощью трех пленок. Этот канал имеет три точки самопересечения.

На рис. 5е показан разряд со сложным каналом, полученный с помощью четырех пленок. Этот канал имеет две точки самопересечения и два звена, на которых электронам необходимо двигаться против поля.

На всех фото – катод слева, отрезок в левом нижнем углу – 100 мкм.

Понятно, что, увеличивая количество пленок, можно и далее усложнять геометрию плазменных каналов.

Если предположить, что в нашей многослойной разрядной структуре форма канала разряда определяется траекторией стримера, то следует обратить внимание на проявившийся здесь новый эффект. Он заключается в следующем. Всякий раз, когда стример должен проходить сквозь пленку через микроотверстие, он должен затем сориентироваться и двигаться к следующему микроотверстию по кратчайшему пути. Этот путь, как мы увидели, часто не совпадает с направлением электрического поля, и даже иногда может быть направлен против поля. Но стример, все-таки, сразу же выбирает правильное направление к следующему микроотверстию. Эта азимутальная самоориентация стримеров (а, следовательно, и плазменных каналов) разрядов является основным, обнаруженным в данной работе результатом. Этот эффект представляется нами как трехмерное обобщение ориентирования плазменных каналов, ранее наблюдавшегося в двумерных лабиринтах [16, 17], в которых канал должен правильно выбрать маршрут на каждом разветвлении пути, который приведет к цели.



Рис. 5. Схемы различных маршрутов (слева) и соответствующие им изображения каналов (справа) однократных наносекундных поверхностных микроразрядов: а – V-образный канал; б – Z-образный канал; в – X-образный канал; г – W-образный канал; д – звездно-образный канал; е – канал сложной формы

Выводы

В данной работе были разработаны, изготовлены и исследованы многослойные структуры, в которых генерируются наносекундные приповерхностные микроразряды при атмосферном давлении. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и плазменный канал разряда формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Рассмотрен процесс получения микроотверстий.

Были получены изображения микроразрядов, подтвердившие, что их плазменные каналы формируются по заданному с помощью отверстий маршруту. При этом маршрут может иметь достаточно сложную схему, иметь точки самопересечения и участки, в которых электроны обязаны двигаться против электрического поля.

При изучении формы каналов в многослойных структурах был обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию.

Литература

1. Iza F., Kim G. J., Lee S. M., Lee J. K., Walsh J. L., Zhang Y. T., Kong M. G. Microplasmas: sources, particle kinetics, and biomedical applications. Plasma Process. & Polym. 2008. Vol. 5, № 4. P. 322–344.

2. Gianchandani Y. B., Wright S. A., Eun C. K., Wilson C. G., Mitra B. Exploring microdischarges for portable sensing applications. Anal. Bioanal. Chem. 2009. Vol. 395, № 3. P. 559–575.

3. Schoenbach K. H., Becker K. 20 years of microplasma research: a status report. Eur. Phys. J. D. 2016. Vol. 70, № 2. P. 29-1-22.

4. Ганиева Г. Р., Зиганшин Д. И., Аухадеев М. М., Тимеркаев Б. А. Электрические микроразряды в жидкостях и перспективы их применения в плазмохимии. Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 1. С. 677–681.

5. Samukawa S., Hori M., Rauf Sh., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J. C., Murphy A. B., Gutsol A. F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.-P., Sommerer T. J., Kushner M. J., Czarnetzki U., Mason N. The 2012 Plasma Roadmap. J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45, № 25. P. 253001-1–37.

6. Wright S. A., Gianchandani Y. B. Controlling pressure in microsystem packages by on-chip microdischarges between thin-film titanium electrodes. J. Vac. Sci. Technol. B. 2007. Vol. 25, № 5. P. 1711–1720. 7. Mitra B., Levey B., Gianchandani Y. B. Hybrid arc/glow microdischarges at atmospheric pressure and their use in portable systems for liquid and gas sensing. IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36, № 4. P. 1913–1924.

8. Lee D.-S., Sakai O., Tachibana K. Mode change observed on spatial distribution of microplasma emission in a microdischarge cell with a floating electrode. Jap. J. Appl. Phys. 2009. Vol. 48, № 10. P. 106002-1–9.

9. Lu M., Park S.-J., Cunningham B. T., Eden J. G. Microcavity plasma devices and arrays fabricated by plastic-based replica molding. J. Microelectromechan. Syst. 2007. Vol. 16, $N \otimes 6$. P. 1397–1402.

10. Hsu C.-C., Tsai J.-H., Yang Y.-J., Liao Y.-C., Lu Y.-W. A foldable microplasma-generation device on a paper substrate. J. Microelectromechan. Syst. 2012. Vol. 21, N_{Ω} 5. P. 1013–1015.

11. Yang Y.-J., Hsu C.-C. A flexible paper-based microdischarge array device for maskless patterning on nonflat surfaces. J. Microelectromechan. Syst. 2013. Vol. 22, № 2. P. 256–258.

12. Yang Y.-J., Hsu C.-C. A flexible paper-based microdischarge array device: a novel route to cost-effective and simple setup microplasma generation devices. IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, N 12. P. 3756–3759.

13. Shatalova V. V., Dubinov A. E. Voids of brightness in nanosecond sliding microdischarges in narrow slot. IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, № 10. P. 2644–2645.

14. Dubinov A. E., Kozhayeva J. P. Generation of nanosecond spark microdischarges along the surface of wings of flying insects. IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, № 3. P. 2049–2053.

15. Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A., Zuimatch E. A., Dubinov A. E. A novel insight on the geometry of plasma channels of nanosecond micron-size discharges on the surface of living tissues of plants. Plasma Process. & Polym. 2015. Vol. 12, № 3. P. 293–296.

16. Dubinov A. E., Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A. Simple device to study influence of nanosecond surface microdischarge plasma on biomaterials. IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43, № 9. P. 3224–3227.

17. Reyes D. R., Ghanem M. M., Whitesides G. M., Manz A. Glow discharge in microfluidic chips for visible analog computing. Lab on a Chip. 2002. Vol. 2, № 2. P. 113–116.

18. Dubinov A. E., Maksimov A. N., Mironenko M. S., Pylayev N. A., Selemir V. D. Glow discharge based device for solving mazes. Phys. Plasmas. 2014. Vol. 21, № 9. P. 093503-1–5.

19. Nijdam S., Takahashi E., Teunissen J., Ebert U. Streamer discharges can move perpendicularly to the electric field. New. J. Phys. 2014. Vol. 16, $N \ge 10$. P. 103038-1–9.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЯМИ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

<u>Р. В. Нечайкин</u>, А. Б. Буянов, А. С. Долотов, В. С. Корчиков, П. В. Сучков, Е. В. Сырых, А. А. Тренькин, П. А. Цицилин, В. А. Чернышов

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

Введение

В НПЦФ функционирует лабораторный электрофизический стенд, предназначенный для моделирования нестационарных физических процессов в околоземном космическом пространстве [1]. Стенд представляет собой совокупность ряда функциональных узлов, расположенных в трех залах общей площадью более 100 м².

Состав стенда можно условно разделить на следующие компоненты: вакуумная камера моделирования, система вакуумирования, система газонапуска, система формирования магнитного поля, система формирования фоновой плазмы, система диагностики и сбора данных.

Камера моделирования представляет собой секционированную цилиндрическую конструкцию из нержавеющей стали (рис. 1). Длина камеры составляет 8 м, диаметр 1 м. На торце расположена вакуумно-плотная дверь. Камера имеет окна для подключения элементов системы газонапуска, диагностического и вспомогательного оборудования.

Система вакуумирования разработана на основе безмасляных насосов и обеспечивает остаточное давление газа в камере при постоянной откачке до 10^{-7} Тор. В состав данной системы входят, рис. 1: турбомолекулярные насосы с водяным охлаждением, форвакуумный насос, вакуумметр, отсекающие шибера с пневмоприводами, а также пневмосистема клапанов, в которую подача сжатого воздуха осуществляется компрессором.

Система газонапуска предназначена для наполнения рабочего объема рабочими газами и их смесями и поддержания заданного давления в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-2} Top.



Рис. 1. Фотография вакуумной камеры, соленоида магнитной системы, системы вакуумирования

Система формирования магнитного поля представляет собой сегментированный соленоид, запитываемый модульным источником питания, обеспечивающий ток до 500 А в импульсах секундного диапазона длительности. Вакуумная камера находится внутри соленоида соосно с ним (рис. 1). Данная система обеспечивает квазистационарное осесимметричное магнитное поле с максимальной величиной индукции магнитного поля на оси вакуумной камеры 0,3 Тл.

Одним из основных элементов системы формирования фоновой плазмы является катодно-подогревательный узел, обеспечивающий формирование в вакуумной камере столба замагниченной плазмы. Катодно-подогревательный узел включает в себя специально разработанный металооксидный термокатод для нагрева которого используются лабораторные источники питания мощностью более 700 Вт каждый. Источники непосредственно подключены к элементам нагрева и обеспечивают регулирование температуры секций термокатода.

Настройка, управление и контроль разнородным пространственно-разнесенным оборудованием в ручном режиме существенно замедляет процесс работы и обслуживания стенда, а также повышает вероятность ошибочных действий. Это становится особенно критичным при проведении экспериментов, когда требуется оперативное управление и контроль состояния экспериментального оборудования в режиме реального времени.

Данное обстоятельство обусловило необходимость создания системы дистанционного управления и контроля функциональными узлами стенда. Решение поставленной задачи связано с разработкой соответствующего программно-аппаратного комплекса включающего в себя технические и программные средства, обеспечивающие удобное интерактивное взаимодействие в режиме реального времени с компонентами стенда.

Для реализации поставленной задачи существуют готовые программные решения, такие как, MasterSCADA, SitectSCADA, Siemens WinCC, ICONICS GENESIS32 [2-5]. Данное программное обеспечение обладает мощными функциональными возможностями, но не лучшим образом подходят к рассматриваемому экспериментальному стенду, так как используются в масштабных производствах и имеют слишком громоздкую структуру, а также ряд излишних свойств и инструментов. Кроме того, они рассчитаны на стандартизированные производственные процессы, в то время как на экспериментальном стенде происходит периодическая модернизация экспериментального оборудования и частая смена настроек и параметров. В этой связи, более рациональным является отказ от готовых решений и создание собственного программного обеспечения для автоматизации управления экспериментальным стендом. Такое ПО способно обеспечить более гибкое управление лабораторным стендом. В этой связи для реализации алгоритмов было выбрано программное обеспечение LabVIEW (Laboratory Virtual

Instrument Engineering Workbench), специализированное для использования в исследовательских лабораториях [6].

Исходя из специфики предназначения и технологии проведения работ на стенде, разрабатываемый программно-аппаратный комплекс должен соответствовать следующим требованиям:

 – обеспечивать возможность включения/выключения и настройки параметров используемого оборудования с централизованного пульта управления;

 – минимизировать влияние человеческого фактора во время работы на экспериментальном стенде;

– программная часть должна иметь интуитивно понятный интерфейс, отображающий показания используемого оборудования в режиме реального времени, а также обладать гибкостью для дальнейшего развития и модернизации.

В данной публикации представлены основные результаты текущей стадии создания программноаппаратного комплекса для дистанционного управления оборудованием экспериментального стенда, включающим систему вакуумирования и источники питания катодно-подогревательного узла. Указанные компоненты стенда были определены в качестве первоочередных, управление которыми является наиболее трудоемким, как на этапе подготовки оборудования к экспериментальному циклу, так и на этапе проведения экспериментов.

Блок управления системой вакуумирования

Структура системы вакуумирования (рис. 2) включает в себя следующее оборудование, требующее дистанционного управления: три турбомолекулярных насоса, вакуумметр, пять клапанов с пневмоприводами, три отсекающих шибера с пневмоприводами. Управление турбомолекулярным насосом производится при помощи серийного блока управления насосом через интерфейс RS-232. Управление контроллером датчика вакуума осуществляется через интерфейс RS-485.

Интерфейс RS-232 - проводной дуплексный интерфейс. Используется в промышленном и узкоспециальном оборудовании [7]. Интерфейс RS-485 высокоскоростной и помехоустойчивый промышленный последовательный интерфейс передачи данных. Обеспечивает обмен данными между несколькими устройствами по одной двухпроводной многоточечной последовательной симметричной линии связи в полудуплексном режиме [8].

Отдельно стоит отметить пневмосистему клапанов и шиберов, которая функционирует на основе 8-канального модуля релейной коммутации и компрессора. Компрессор используется для поддержания определенного уровня избыточного давления в пневмосистеме. Данная модель компрессора не имеет возможности дистанционного управления. По этой причине контроль данного устройства с центрального пульта не возможен. Управление модулем релейной коммутации осуществляется по двухпроводному интерфейсу RS-485.

Принимая во внимание минимальные требования к коммуникационному оборудованию, а именно, необходимость подключения устройств по интерфейсам RS-232 и RS-485, а также передача данных на расстояние до 15 метров, для реализации разрабатываемой системы выбрана клиент-серверная архитектура сети. В качестве сервера используется компактный промышленный компьютер, в качестве клиента – персональный компьютер. Ввиду наличия в стойке с сервером диагностического оборудования, сеть организована при помощи сетевого коммутатора [9, 10]. Структура подключения сетевого оборудования и элементов системы вакуумирования изображена на рис. 3.



Рис. 2. Структура системы вакуумирования: CV1 – камера моделирования, NI1 – форвакуумный спиральный насос, NR1-NR3 – турбомолекулярные насосы, VP1-VP5 – клапаны с пневмоприводами, VP6-VP8 – шиберы с пневмоприводом, P1 - широкодиапазонный вакуумметр



Рис. 3. Структура подключения сетевого оборудования и элементов системы вакуумирования

Рассмотрим интерфейс и принципы работы разработанных клиентского и серверного приложений. Клиентское приложение состоит из основной программы, а также, программы предварительной настройки. После подачи питания к элементам системы вакуумирования и запуска клиентской части приложения происходит установление соединения по сетевому протоколу ТСР между клиентским и серверным приложениями. В среде программирования LabWIEV для этих целей имеется ряд стандартных встроенных решений [11, 12]. Соединение происходит следующим образом: серверное приложение находится в состоянии прослушивания заданного порта, в клиентском приложении в программе предварительной настройки задается IP адрес сервера и порт, по которому происходит попытка соединения. Изображение диалогового окна предварительной настройки клиентской части приложения показано на рис. 4.

После установки соединения с серверным приложением начинается ассоциация доступных на сервере СОМ-портов и подключаемого оборудования. Серверное приложение по запросу присылает список доступных СОМ-портов, и пользователю становится возможен выбор СОМ-порта для каждого объекта управления.

Далее происходит последовательная проверка модуля релейной коммутации, трех турбомолекулярных насосов и датчика давления: с клиентского приложения поступают команды для проверки соединения с каждым из устройств, серверное приложение пересылает команду на соответствующий СОМ-порт, устройство отвечает на команду, серверное приложение считывает команду-ответ с данного порта и отсылает ее на клиентское приложение. Клиентское приложение делает обработку и, в случае неправильного ответа или его отсутствия, выводит сообщение о неисправности. Если все оборудование подключилось успешно, приложение продолжает работу.



Рис. 4. Диалоговое окно предварительной настройки клиентской части приложения

Далее пользователю предоставляется выбор действий в основном окне программы клиентской части приложения. Изображение данного окна показано на рис. 5.



Рис. 5. Основное окно программы клиентской части приложения

В приложении имеется изображение схемы системы вакуумирования лабораторного стенда, график давления в вакуумной камере. Клапаны и насосы на схеме стенда представляют собой интерактивные кнопки управления открытием/закрытием клапанов, а также замедления/ускорения турбомолекулярных насосов. При нажатии на изображения кнопок происходит включение или выключение насосов, либо открытие или закрытие шиберов. Индикация конкретного состояния всех перечисленных устройств обеспечивается подсветкой соответствующих кнопок. Трубы, изображенные на схеме, также являются индикаторами. Если по отрезку трубы течет воздух, то изображение трубы подсвечивается. Под иконкой насосов имеется шкала, показывающая текущую мощность работы насоса. Вакуумметр показывает текущие значение давления в камере, а график давления – изменение этого давления с течением времени. График имеет адаптивную систему подбора масштаба по оси абсцисс – это дает наглядное изображение изменения давления.

Таким образом, разработанная система позволяет в режиме реального времени осуществлять дистанционное управление и контроль параметров оборудования системы вакуумирования из пультового помещения. А именно, включение и выключение турбомолекулярных насосов, установка и контроль уровня мощности каждого насоса, закрытие и открытие клапанов и шиберов, визуализация текущих показаний уровня давления в вакуумной камере и его изменения во времени, наличие движения газа по трубопроводам.

Блок управления источниками питания катодно-подогревательного узла

Специфика проведения экспериментального моделирования требует обеспечения однородного нагрева до заданной температуры всей эмиссионной поверхности термокатода. Поскольку термокатод имеет секционную структуру, используется восемь источников питания, по два на каждую секцию (рис. 6). Для регулирования температуры термокатода необходима синхронная подача индивидуальных значений напряжения на каждую секцию. Результатом решения данной задачи стала разработка системы дистанционного управления для регулирования параметров источников питания с централизованного пульта управления.



Рис. 6. Фотография стойки с источниками питания секций термокатода

В виду того, что источники питания катодноподогревательного узла находятся на значительном удалении от управляющего компьютера, в качестве коммуникационного оборудования используется серверное устройство фирмы МОХА [13]. Данное устройство, работая в режиме Real COM Mod, способно выполнять роль виртуального СОМ-порта. На практике это означает, что управляющий компьютер получает дополнительный СОМ-порт, фактически удаленный на несколько десятков метров. Схема подключения оборудования при этом такова, что источники питания подключены к серверному устройству, а оно, в свою очередь, через коммутатор подключено к управляющему компьютеру в пультовом помещении (рис. 7). При коммуникации серверное устройство использует сетевой протокол TCP/IP.

Используемые источники питания имеют возможность дистанционного управления по интерфейсу RS-485 и обладают собственным набором команд. Все используемые модули соединены последовательно и по умолчанию находятся в режиме ожидания команды. Обмен данными с устройствами осуществляется последовательно. Для доступа к устройству с управляющего компьютера должен быть послан адрес устройства. После этого устройство, распознавшее адрес, становится активным и может обмениваться данными с управляющим компьютером. Остальные устройства остаются в режиме ожидания. Процедура инициализации обмена данными со всеми модулями системы аналогична.

Пользовательский интерфейс программы для дистанционного управления нагревом термокатода представлен на рис. 8.



Рис. 7. Структура подключения сетевого оборудования и элементов катодно-подогревательного узла в системе управления источниками питания

Секция 3-1 С Напряжение 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение напряжение 0 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение напряжение 0 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение напряжение 0 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение Напряжение 0 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 Лекститование значение 10 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 6 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0				
Напражение 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 40 Действитовные значение Напражение Подражение Подражение Секция 3-2 Секция 3-2 Паражение Подоствитовные значение Подоствитовные значение Подоствитовные Подоствитовные значение Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовнае Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные Подоствитовные		секция 1-1 🔘	секция 2-1 🌑	секция 3-1 🔍
b 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 c 6 10 10 20 20 c 8 10 10 10 20 20	3 O	Напряжение	Напряжение	апряжение
Дейститетовные значение: 0.000 Аракститетовные значение: 0.000 Дейститетовные значение: 0.000 Капражесние 0.000 Вапражесние 0.000 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 0.000 Дейститетовные значение: 0.000 Вапражесние 0.000 Выборите порт: 0.000 Дейститетовные значение: 0.000 Тож Потовные Папражение 0.000 Дейститетовные значение: 0.000 Тож Потовные Папражение 0.000 Папражение 0.000 Дейститетовные значение: 0.000 Папражение 0.000 <td></td> <td></td> <td>I I A A A A A A A A A A A</td> <td></td>			I I A A A A A A A A A A A	
Напражение Ток Ток Ток Соскция 3.2 Дановно чалова избалено со 0.005 Ток Соскция 3.2 Дановное за со 25 зо 25 зо 25 об 55 сб Дектительные значение Напражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папражение Папра Папражение Папражение Папражение Папра Папражение Папражение Папражение Пап	5 30 35 40 45 50 55 0	0 5 10 15 20 25 30 35	0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55	7 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 35 60
ток 00.000 Секция 3-2 Бапражение 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 Декстиятельные монения: напражение Секция 4-1 Бапражение Секция 4-1 Секция 4-1 Секц	00.000	Напряжение	Напряжение 00.000	Напряжение 00.005
секция 3-2 Самара Вонс Сонча Тов 200 Сокцая 1-2 Сокцая	00.000	Ток	Connectional	Tox. 00.000
секция 3-2 Ф апражение 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 50 Дективтельные значение Папражение 0 0.000 тос секция 4-1 Ф апражение 0 10000 тос секция 4-1 Ф апражение 0 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 100000 10000 100000 10000 10000 100000 10000 100000 10000 1000			Ble Edit View Broject Querate Tools Wind	120
Напряжение 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 Декствительные значение Такаражение 00.000 ток 0.000 Тереченть 0.0000 Тереченть 0.0000 Теречент		секция 1-2 🔘		секция 3-2 🎱
5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 Acktrateroname susweiner 00.000 1 10 5 10 15 20 25 10 15 20 2 Acktrateroname Imposement 00.000 1 1 1 2 Acktrateroname	- 0	Напряжение	Настройка соединения	апряжение 0
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5			Выборите порт: Всона т	
Algebraneme 0.000 Tox 00.000	5 30 35 40 45 50 55 6	0 5 10 15 20 25 30 35		5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
така така секция 4.1 Ф Паражение 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ые значения:	Действительные значени	ИСТОЧНИКОВ:	Действительные значения:
cenupsi 4-1 appacente appacente b d d d b d d d d d d d d d d d d d d d	0.000			
секция 4.1 Не использу Напряжение	1 00.000	TOK	Company	Tox 00.000
Anapancemente 0 Terrescande Anapancemente 0 Hanapancemente	etca @	Не используется		410
	dia a	Напряжение	TermoCatod.hyproj.My Computer	Тапряжение
	J. o			
3 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 0 5 10 15 20 2	5 30 35 40 45 50 55 6	0 5 10 15 20 25 30 35	0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Действительные значения: Действительные значения: Действительн	ые значения:	Действительные значени	Действительные значения:	Действительные значения:
Напражение 00.000 Напражение 00.000 Напражение	00.000	Напряжение	Напряжение 00.000	Hanpaskesse 00.000

Рис. 8. Интерфейс программы управления источниками питания катодно-подогревательного узла

Первоначально пользователю необходимо выбрать порт, через который подключены источники питания. В виду специфики стенда количество источников периодически меняется, по этой причине необходимо указать количество подключаемых в данный момент устройств. После этого пользователю становится доступным основное окно программы, где непосредственно осуществляется управление уровнем напряжения на каждом отдельном устройстве. Минимальный шаг изменения напряжения равен 1 В, максимальный – 5 В. Периодически происходит обновление параметров источников питания и отображаются фактические значения напряжения и тока. Параллельно с обновлением данных с устройств, происходит процедура опроса регистров операционного статуса, статуса тревоги и кодов ошибок. В случае возникновения какой-либо нештатной ситуации, пользователь получит сообщение с описанием возможной причины сбоя системы.

Таким образом, разработанная система обеспечивает регулирование параметров и контроль массива источников питания катодно-подогревательного узла из пультового помещения в режиме реального времени.

Выводы

Представлено описание текущей стадии разработки программно-аппаратного комплекса для дистанционного управления модулями на экспериментальном стенде.

К настоящему времени разработаны и находятся в эксплуатации системы для дистанционного управления системой вакуумирования и источниками питания катодно-подогревательного узла. Комплекс позволяет оператору в режиме реального времени осуществлять дистанционное управление и мониторинг параметров оборудования с централизованного пульта.

Комплекс обеспечивает возможность управления и контроля:

– системой вакуумирования в части включения и выключения турбомолекулярных насосов, установки и контроля уровня мощности каждого насоса, закрытия и открытия клапанов и шиберов, визуализации текущих показаний уровня давления в вакуумной камере и его изменения во времени, наличия движения газа по трубопроводам;

 массивом источников питания катодно-подогревательного узла в части регулирования и контроля их параметров.

Разработанный комплекс позволил:

 – значительно сократить время подготовки стенда для проведения экспериментов;

 существенно увеличить скорость взаимодействия оператора с оборудованием и контроля ситуации во время проведения эксперимента;

 – уменьшить вероятность ошибочных действий в управлении оборудованием.

Литература

1. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2009 / Под ред. акад. РАН Илькаева Р. И. и др. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 2009 г. С. 27.

- 2. https://insat.ru
- 3. http://www.scada.ru
- 4. http://www.siemens.com
- 5. https://www.iconics.com
- 6. http://www.labview.ru

7. Гук М. Ю. Интерфейсы ПК: Справочник – СПб.: Питер Ком, 1999

8. Гук М. Ю. Аппаратные средства IBM РС. СПб: Питер, 2006

9. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2012

10. Гук М. Ю. Аппаратные средства локальных сетей. СПб: Питер, 2000

11. Тревис Дж., Кринг Дж. LabView для всех. М.: ДМК Пресс, 2008

12. Блюм П. LabView: стиль программирования. М.: ДМК Пресс, 2008

13. http://www.moxa.ru
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1.5 МЭВ НА УСКОРИТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ВЫСОКОЙ МОЩНОСТЬЮ ПУЧКА

<u>А. М. Опекунов</u>, А. Н. Беляев, Я. В. Бодряшкин, И. В. Жуков, В. В. Кузнецов, Н. Н. Курапов, И. А. Машин, Л. Е. Поляков, Г. П. Поспелов, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, А. Н. Шеин, И. В. Шориков

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается резонансный ускоритель [1] для генерации пучка электронов с энергией в диапазоне от 1,5 до 7,5 МэВ со средней мощностью пучка до 300 кВт. Основой ускорителя является полуволновый коаксиальный резонатор, при многократном прохождении которого электроны набирают необходимую энергию.

В работе представлены результаты компьютерного моделирования динамики электронов. В результате расчетных исследований определены критерии инжекции электронного пучка в ускоритель, при которых реализуются достаточные условия для получения пучка электронов необходимой энергии с минимальными потерями тока. Экспериментальные исследования проводились при уровне мощности ВЧ сигнала до 180 кВт. Получен пучок электронов со средней энергией 1,5 МэВ. Разброс электронов по энергии составил менее 100 кэВ. Измеренный средний ток электронов не зафиксированы.

Введение

Создаваемый ускоритель электронов предназначен для работы как в импульсно-периодическом режиме, так и в режиме непрерывной генерации излучения.

В настоящее время собран действующий ускоритель (рис. 1), включающий коаксиальный ускоряющий резонатор (100 МГц), ВЧ инжектор (100 кэВ, 40 мА), ВЧ генератор (180 кВт), узел ввода ВЧ мощности, вакуумную систему, систему термостабилизации, автоматизированную систему управления, а также элементы магнито-оптической системы и системы вывода электронного пучка.

Ускорение электронов в таком ускорителе происходит при их многократном прохождении диаметра коаксиального ускоряющего резонатора в его поперечной медианной плоскости [2]. При средней мощности ВЧ питания ~ 165 кВт в ускоряющем резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания типа T_1 с напряженностью электрического поля, достаточной для приращения энергии электронов ~ 1,5 МэВ за один проход при «нулевом» токе пучка [1].



Рис. 1. Внешний вид ускорителя: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – узел ввода ВЧ мощности; 3 – ВЧ инжектор; 4 – ВЧ генератор 16 кВт; 5 – вакуумные насосы; 6 – ВЧ генератор 180 кВт; 7 – коаксиальный волновод

Расчет динамики ускорения электронов

Расчет динамики электронных сгустков проведен в программе трехмерного компьютерного моделирования динамики заряженных частиц ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm) [3]. Основная задача на данном этапе – определение критериев инжекции электронного пучка в ускоряющий резонатор, при которых энергия ускоренных электронов составит 1,5 МэВ. Причем потери тока на всех участках ускорения должны быть сведены к минимуму.

Схема ускорения, используемая в расчетах, представлена на рис. 2а. Электронные сгустки формируются в ВЧ инжекторе 1, после чего инжектируются в ускоряющий резонатор 3 через канал инжекции 2.



Рис. 2. Компьютерное моделирование динамики электронного пучка: а – схема ускорения; б – эволюция огибающей электронного пучка: 1 – ВЧ инжектор; 2 – канал инжекции; 3 – ускоряющий резонатор

Согласно проведенным расчетам поперечные размеры электронных сгустков непрерывно возрастают сразу на выходе из ВЧ инжектора вследствие действия пространственного заряда (рис. 2б). В случае отсутствия радиальной фокусировки поперечные размеры электронного пучка приближаются к апертуре канала инжекции, что приведет к потере электронов. Поэтому необходимо обеспечить радиальную фокусировку электронного пучка по ходу его дрейфа в канале инжекции.

Вклад поперечных компонент (*x*- и *y*-компоненты) электрического поля в резонаторе ускорителя

на фокусировку электронного пучка при его ускорении различен [1]. Такой различный вклад приводит к перефокусировке электронного пучка в горизонтальной и дефокусировке в вертикальной плоскостях. Поперечное сечение электронного пучка после ускорения примет эллипсоидальную форму (рис. 2б). Для получения более изотропного распределения электронов в поперечном сечении сгустка необходимо обеспечить жесткую магнитную фокусировку при помощи магнитной квадрупольной линзы.

На рис. За приведена схема ускорения, дооснащенная магнито-оптическими элементами: фокусирующие соленоиды и магнитная квадрупольная линза. Как можно заметить, распределение электронов в поперечном сечении сгустка становится более изотропным на выходе из ускоряющего резонатора (рис. 3б). Размеры электронного пучка остаются в пределах апертуры пролетных каналов (40 мм), а влияние поля квадрупольной линзы не приводит к дополнительным потерям частиц в широкой области его градиентов (от 10 до 40 мТл/м).



Рис. 3. Компьютерное моделирование динамики электронного пучка: а – оптимизированная схема ускорения; б – эволюция огибающей электронного пучка: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующие соленоиды; 3 – магнитная квадрупольная линза; 4 – ускоряющий резонатор

Из вышесказанного следует, что формирование электронного сгустка происходит уже на этапе инжекции. На рис. 4 представлен внешний вид действующего канала инжекции. Для формирования поперечных размеров электронного пучка в пределах апертуры канала инжекции применяются фокусирующий соленоид № 1, расположенный на корпусе резонатора ВЧ инжектора, и фокусирующий соленоид № 2. При помощи магнитной квадрупольной линзы осуществляется жесткая магнитная фокусировка.



Рис. 4. Внешний вид канала инжекции: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующий соленоид № 1; 3 – высоковакуумный шибер; 4 – фокусирующий соленоид № 2; 5 – магнитная квадрупольная линза; 6 – ускоряющий коаксиальный резонатор

Рис. 5 отображает картину набора энергии электронами в процессе их ускорения, полученную расчетным путем. Формирование и ускорение электронных сгустков до энергии ~ 100 кэВ происходит в ВЧ инжекторе, о чем свидетельствует набор энергии электронами в интервале координат от 0 до 100 мм. Далее электронный пучок транспортируется по каналу инжекции без приращения энергии, что видно из рис. 5, в интервале координат от 100 до 840 мм. Основной этап ускорения электронов происходит на участке от 840 до 3000 мм. Данный этап набора энергии электронами разбит на два участка, так как ускоряющий резонатор разделен центральным проводником (рис. 3а).



Рис. 5. Результат расчета набора энергии электронами

На рис. ба представлена расчетная зависимость энергии электронов в сгустке от фазы их инжекции в ускоряющий резонатор. Видно, что в диапазоне фаз инжекции от – 20 до – 5 градусов можно получить

электроны с энергией 1,5 МэВ. При удалении от обозначенного диапазона фаз достигнуть энергии в 1,5 МэВ за один проход невозможно.

На рис. 6б представлена расчетная зависимость разброса энергии электронов в сгустке от фазы инжекции. При инжекции электронов в ускоряющий резонатор в обозначенном диапазоне фаз, можно достигнуть среднеквадратичного энергетического разброса электронов в сгустке ~ 30 кэВ.



Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования: а – зависимость средней энергии электронов от фазы инжекции в ускоряющий резонатор, б – зависимость энергетического разброса электронов в сгустке от фазы инжекции в ускоряющий резонатор

По результатам расчетов можно заключить следующее:

 подобраны режимы работы основных узлов установки таким образом, что на выходе из ускоряющего резонатора можно получить электронный пучок с энергией 1,5 МэВ, причем потери тока на всем участке транспортировки сведены к минимуму или отсутствуют вовсе;

 – для минимизации потерь электронов на всем участке транспортировки индукцию магнитного поля в центре фокусирующего соленоида канала инжекции необходимо варьировать в интервале от 12 до 15 мГл; – для получения наиболее однородного распределения электронов в поперечном сечении сгустка на выходе из ускорителя градиент магнитного поля квадрупольной линзы канала инжекции необходимо обеспечивать в пределах от 20 до 30 мТл/м. Изменением градиента магнитного поля можно варьировать размеры электронного сгустка в поперечном сечении. Так при 20 мТл/м среднеквадратичные размеры сгустка на выходе из ускоряющего резонатора составляют ~ 4×10 мм, при 30 мТл/м – 5×8 мм;

– для набора энергии электронами в 1,5 МэВ необходимо инжектировать их в ускоряющий резонатор при отрицательной фазе ВЧ поля – в диапазоне от – 20 до – 5 градусов. При этом можно получить достаточно монохроматичный пучок ускоренных электронов с энергетическим разбросом ~ 30 кэВ.

Результаты экспериментальных исследований

В качестве режима работы ускорителя использован импульсно-периодический режим генерации мощности ВЧ генератора на рабочей частоте. Длительность радиоимпульса составляла 2 мс, период повторения импульсов – 40 мс, частота посылки электронных сгустков – 200 кГц. Средний ток электронного пучка в таком случае составляет ≈ 4 мкА. При таком токе исключена вероятность перегрева выпускной фольги вакуум-атмосферного окна и внутренних стенок рабочих объемов ускоряющего

резонатора в процессе измерений характеристик пучка и настройки режимов работы магнито-оптических элементов.

В целях определения наличия пучка ускоренных электронов на расстоянии 150 мм от выходного вакуум-атмосферного окна выводного устройства ускорителя была установлена алюминиевая пластина с люминесцентным покрытием. Регистрация интегральной картины свечения производилась с помощью интеллектуальной цифровой видеокамеры [4]. Проведенный таким образом эксперимент впервые продемонстрировал ускоренные электроны (рис. 7) и помог предварительно подобрать критерии инжекции электронов в ускоряющий резонатор по интенсивности свечения люминофора.

Вторым экспериментальным этапом по регистрации ускоренных электронов стала установка цветной дозиметрической пленки на расстоянии 25 мм от выводного устройства. В режиме работы без магнитной квадрупольной линзы канала инжекции получен электронный пучок, который воздействовал на дозиметрическую пленку в течение 20 секунд. В результате воздействия на пленке образовалось потемнение, как показано на рис. 8а. На рис. 86 представлено восстановленное градиентное изображение отпечатка. Для сравнения на рис. 8в представлен расчетный поперечный профиль пучка электронов. Видно, что профили пучка качественно совпадают. Поглощенная доза после 20 с воздействия составила не менее 1,6 Мрад (ток электронного пучка ≈ 4 мкА).



Рис. 7. Снимок свечения люминофора от взаимодействия с выведенными электронами: а – внешнее освещение присутствует; б – внешнее освещение отсутствует



Рис. 8. Эксперимент с дозиметрической пленкой: а – отпечаток электронного пучка; б – восстановленное градиентное изображение; в – расчетный поперечный профиль пучка электронов

В следующем эксперименте регистрация ускоренных электронов производилась путем установки на расстоянии 25 мм от выходного вакуум-атмосферного окна выводного устройства сцинтилляционного экрана из пластмассы сцинтиллирующей на основе стирола, который формировал изображение в видимом спектре, характеризующее распределение электронного излучения в поперечном сечении пучка. Для регистрации интегральной картины свечения экрана использовалась цифровая видеокамера ИВД [4]. На рис. 9 приведена схема эксперимента; цифровая видеокамера направлена на зеркало.



Рис. 9. Постановка эксперимента: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – выводное устройство; 3 – полистирол; 4 – зеркало

На рис. 10а представлен снимок сцинтилляционного экрана до проведения эксперимента, а на рис. 10б и в – картины свечения сцинтилляционного экрана, возникающего при взаимодействии с электронным излучением.

Картина свечения на рис. 10б соответствует режиму работы ускорителя с незадействованной магнитной квадрупольной линзой канала инжекции. Участок свечения на сцинтилляторе принимает эллипсоидальную форму, что соответствует анизотропному распределению электронов в поперечном сечении сгустка на выходе из ускоряющего резонатора. Это объясняется различным вкладом поперечных компонент ускоряющего электрического поля в ускоряющем резонаторе на фокусировку электронного пучка, о чем предсказывалось на этапе расчетных исследований.

Используя магнитную квадрупольную линзу канала инжекции, видим, что картина свечения на сцинтилляторе приобретает изотропную форму (рис. 10в), что соответствует более однородному распределению электронов в поперечном сечении сгустка, причем диаметр пятна на сцинтилляционном экране составляет ~ 35 мм.







Рис. 10. Эксперимент с полистиролом: а – постановка эксперимента; б – картина свечения сцинтилляционного экрана без магнитной квадрупольной линзы; в – картина свечения сцинтилляционного экрана при включении магнитной квадрупольной линзы: 1 – сцинтиллятор (полистирол); 2 – зеркало; 3 – отраженное изображение сцинтиллятора

Дальнейшие испытания были направлены на измерения энергетических характеристик ускоренных электронов методом поглощающих фильтров [5]. Использованный детектор энергии представляет собой измерительную сборку из 23 изолированных между собой алюминиевых пластин толщиной 0,15 мм с воздушным зазором 2 мм между каждой. Компьютерная модель детектора энергии показана на рис. 11. На рис. 12 показана постановка эксперимента с детектором энергии.



Рис. 11. Компьютерная модель измерительной сборки: 1 – алюминиевые пластины; 2 – изоляция между пластинами; 3 – выводы для измерения тока; 4 – вентилятор; 5 – стягивающие фланцы; 6 – несущий каркас; 7 – направление оси электронного пучка



Рис. 12. Постановка эксперимента с детектором энергии:1 – ускоряющий резонатор; 2 – выводное устройство;3 – детектор энергии

Энергетическая характеристика электронов в пучке восстанавливается по распределению зарядов, поглощенных в пластинах детектора. В процессе эксперимента при прохождении электронного пучка через детектор поочередно измеряется ток с каждой пластины, при этом остальные пластины электрически соединяются и заземляются. Таким же способом, можно определить и средний ток электронного пучка.

На рис. 13а представлено типичное экспериментальное распределение зарядов по пластинам измерительной сборки, а на рис. 136 -результаты расчетов распределения зарядов по пластинам для моноэнергетических электронов с энергиями 1,45, 1,5 и 1,55 МэВ, проведенных по методике С-007 методом Монте-Карло [6]. Очевидно качественное совпадение результатов эксперимента и проведенных расчетов. Измеренный средний ток электронов на выходе ускоряющего резонатора составил ≈ 4 мкА.



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23



Рис. 13. Распределение зарядов по пластинам детектора энергии: а – экспериментальные данные; б – расчетные данные

Используя расчетные и экспериментальные распределения зарядов в пластинах измерительной сборки, был восстановлен энергетический спектр ускоренных электронов после одного прохода ускоряющего резонатора (рис. 14). Средняя энергия ускоренных электронов составила 1,52 МэВ. Разброс энергии электронов – не более 100 кэВ.



Рис. 14. Восстановленный энергетический спектр электронов после одного прохода

Дальнейшие испытания были направлены на увеличение среднего тока ускоренных электронов. При работе в импульсно-периодическом режиме увеличить средний ток пучка можно путем изменения частоты посылки электронных сгустков с катода ВЧ инжектора (изменение скважности). Однако необходимо быть уверенным в отсутствии потерь тока электронов на участке ускорения.

Описанные выше эксперименты проводились при токе электронного пучка ≈ 4 мкА. По результатам проведенных экспериментов сделан вывод, что потери тока на участке ускорения отсутствуют. Утверждать это можно по следующим причинам.

1. Отклонение электронного пучка от оси канала ускорения фиксировалось в эксперименте с использованием сцинтилляционного экрана, схема которого представлена на рис. 8. В ходе экспериментов режим работы магнито-оптических элементов канала инжекции (рис. 4) был настроен таким образом, чтобы свечение сцинтилляционного экрана, возникающее от взаимодействия электронов с веществом сцинтиллятора, наблюдалось в центральной области. Следовательно, наблюдая свечение в обозначенной области, можно утверждать, что электроны ускоряются вдоль оси канала ускорения. Типичная картина свечения сцинтиллятора представлена на рис. 10. Однако, это не говорит об отсутствии потерь тока.

2. Средний ток электронного пучка, генерируемого ВЧ инжектором, можно оценить следующим образом:

$$I_0 = q f_{\rm MM\Pi},\tag{1}$$

где $f_{\rm HM\Pi}$ – частота посылки электронных сгустков; q = 0,42 нКл – заряд в электронном сгустке [7].

По условию эксперимента частота посылки электронных сгустков $f_{\rm ИМП} = 200$ кГц. Тогда согласно выражению (1) имеем

$$I_0 = q f_{\rm IM\Pi} = 0,42 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 = 8,4 \cdot 10^{-5} (A) = 84 \text{ MKA}.$$
 (2)

Длительность радиоимпульса t, генерируемого ВЧ генератором, составляет 2 мс, период их повторения T - 40 мс. Поэтому можно определить скважность

$$\tau = \frac{T}{t} = \frac{40}{2} = 20.$$
(3)

Согласно выражению (2) средний ток электронного пучка, генерируемого ВЧ инжектором, составляет 84 мкА, а согласно выражению (3) скважность равна 20. Тогда средний ток электронного пучка на выходе ускоряющего резонатора можно оценить так:

$$I = \frac{I_0}{\tau} = \frac{84}{20} = 4, 2 \, (\text{MKA}). \tag{4}$$

Именно такой средний ток ускоренных электронов и был зарегистрирован в эксперименте с детектором энергии. Следовательно, можно заключить, что потери тока на всем участке ускорения не существенны.

Убедившись в отсутствии потерь тока электронов в процессе их ускорения, средний ток электроного пучка последовательно повышался. Для регистрации среднего тока ускоренных электронов на выходе ускоряющего резонатора использовался поглотитель электронов (цилиндр Фарадея), установленный на расстоянии ~ 40 мм от выпускного вакууматмосферного окна. Общий вид поглотителя электронов показан на рис. 15.

Средний ток ускоренных электронов повышался путем увеличения частоты посылки электронных сгустков с катода ВЧ инжектора. Задаваемая в эксперименте максимальная частота посылки электронных сгустков составила 5 МГц. Ожидаемый средний ток ускоренных электронов можно оценить по формуле (1), используя соотношение (4):

$$I = \frac{I_0}{\tau} = \frac{qf_{\rm IM\Pi}}{\tau} = \frac{0,42 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^6}{20} =$$
$$= 105 \cdot 10^{-6} (A) = 105 \,\mathrm{mkA}.$$

Зафиксированный в эксперименте средний ток электронного пучка составил ~ 100 мкА.



Рис. 15. Поглотитель электронов (цилиндр Фарадея): а – компьютерная модель; б – продольное сечение; в – внешний вид: 1 – корпус; 2 – рубашка охлаждения; 3 – входное окно; 4 – штуцер

Заключение

В результате расчетных исследований определены и сформулированы требования к режимам работы основных узлов ускорителя для получения пучка электронов с энергией 1,5 МэВ с минимальными потерями тока. Для получения пучка с требуемыми характеристиками необходимо инжектировать электроны в диапазоне фаз ВЧ поля в ускоряющем резонаторе, определяющемся интервалом от -20 до -5 градусов. При этом можно получить достаточно монохроматичный пучок ускоренных электронов с энергетическим разбросом ~ 30 кэВ.

При подаваемой в ускоряющий резонатор импульсной ВЧ мощности ~ 165 кВт за один этап ускорения получен пучок электронов со средней энергией 1,5 \pm 0,05 МэВ при среднем токе пучка ~ 100 мкА.

Экспериментально полученные спектральноэнергетические характеристики ускоренных электронов и поперечные размеры электронного пучка на выходе ускоряющего резонатора удовлетворительно коррелируют с расчетными данными.

Таким образом, основная цель исследований достигнута – подтверждена возможность получения пучка электронов с энергией 1,5 МэВ.

Литература

1. Telnov A. V., Gordeev V. S., Zavialov N. V. et al. Progress in CW Mode Electron Resonance

Accelerator BETA-8 Development // Proceeding of XXV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2016». 2017. P. 185–187.

2. Pottier J. A New Type of RF Electron Accelerator: the Rhodotron // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. 1989. Vol. B40/41. P. 943–945.

3. Floettmann K. Astra User's Manual. http://www. desy.de~mpyflo/Astra documentation.

4. Жуков И. В., Мочалов М. Р. и др. Интеллектуальный визуальный датчик событий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. Вып. 15. С. 506–513.

5. Курапов Н. Н., Бодряшкин Я. В., Леонтьев В. Н. и др. Система оперативного контроля энергии электронного пучка ускорителей ЛУ-7-2 и ЛУ-10-20 // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2017. С. 222–228.

6. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

7. Опекунов А. М., Беляев А. Н., Кузнецов В. В. и др. Система инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8. Расчеты и эксперимент // Молодежь в науке: сборник докладов 15-й научно-технической конференции. 2017. С. 229–235.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫРАВНИВАНИЮ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ

<u>Е. И. Осетров,</u> В. М. Изгородин, Е. Ю. Соломатина, А. П. Пепеляев, А. А. Кострикина, С. П. Баринов, Е. Ю. Зарубина, С. Ю. Батуков, Н. Н. Мариничева

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

Важнейшим этапом развития современных исследований в области лазерного термоядерного синтеза являются технологии получения криогенных мишеней. В простейшем виде такая мишень представляет собой полимерную оболочку и криогенный слой топлива, намороженный на внутренней поверхности. Требования, предъявляемые к качеству твердого водородного слоя, в криомишенях достаточно высоки: шероховатость поверхности криогенного слоя не должна превышать 1 мкм, разнотолщинность (отклонения от сферичности) – не более 1 % [1]. Одним из наиболее эффективных методов выравнивания по толщине криогенного слоя в процессе его формирования является нагрев инфракрасным излучением [2].

Метод нагрева криогенного слоя инфракрасным излучением используется при работе с нерадиоактивными изотопами водорода – дейтерием, протием и их смесями. Он базируется на эффекте поглощения ИК-излучения изотопами водорода. Вещество перераспределяется с более нагретой (и более толстой) в менее нагретую (более тонкую) область на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины происходит с экспоненциальным затуханием, так как по мере выравнивания градиент температуры на поверхности слоя снижается.

Проведены расчетно-теоретические исследования возможностей выравнивания по толщине криогенного твердого слоя дейтерия на внутренней поверхности сферической оболочки. На основе их результатов был выбран источник ИК-излучения и подобраны соответствующие конструкционные материалы. Наиболее предпочтительным вариантом, на наш взгляд, является использование лазера среднего ИК-диапазона с центральной длиной волны 3,16 мкм (пик поглощения дейтерия) или 2,57 мкм (пик поглощения протия) и выходом под оптоволокно. Использование оптоволокна позволит исключить нагрев конструкционных материалов, доставить излучение с минимумом потерь, а главное – обеспечить возможность однородного нагрева криогенного слоя рассеянным в полости бокса инфракрасным излучением. Это требует использования специального одномодового оптоволокна, эффективно проводящего ИК-излучение заданной длины волны. Для таких целей используются флюоридные оптоволокна.

Экспериментальная часть

Эксперименты по намораживанию изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке с последующим ИК-нагревом проводились на стенде для исследования мишеней при низких температурах. Стенд состоит из исследовательского криостата, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оптической схемы визуального контроля и системы контроля температуры. Фото стенда представлено на рис. 1.

В общем случае существует две основных схемы проведения эксперимента по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке с помощью инфракрасного излучения.



Рис. 1. Стенд для исследования мишеней при низких температурах

Первая схема – внешнее облучение [2]. Инфракрасное излучение лазера заводится в полость экспериментального мишенного бокса через ИК-прозрачные окна криостата, криоэкрана и бокса. При разработке схемы эксперимента важно реализовать нагрев только водородного топлива, что, при наличии множества конструкционных материалов, окружающих экспериментальную сборку, становится очень нетривиальной задачей. Данная схема предполагает использование различных оптических схем, позволяющих заводить инфракрасное излучение внутрь экспериментального бокса. На сегодняшний момент реализован вариант нагрева через оптоволокно, которое закреплено на 5-координатном столике. Это позволяет направлять излучение под различными углами, ограничиваясь лишь апертурой смотровых окон экспериментального бокса, криоэкрана и оптического стакана криостата. И позволяет уйти от применения сложных оптических схем.

Вторая схема представляет собой нагрев криогенного слоя изотопов водорода инфракрасным излучением через оптоволокно, которое заводится непосредственно в корпус экспериментального бокса («сферы выравнивания») [3]. На сегодняшний день этот вариант является наиболее перспективным, поскольку здесь снимается проблема нагрева конструкционных материалов, окружающих оболочку и пропадает потребность в использовании дополнительных фильтров и сложных оптических схем. Однако, данную схему гораздо сложнее реализовать технически, поскольку заведение хрупкого оптоволокна без риска разрушения и потери герметичности в экспериментальный бокс – очень непростая задача.

На рис. 2 показан оптический стакан криостата, в котором располагается экспериментальный бокс. При реализации схемы нагрева через смотровые окна криостата, воздействию инфракрасного излучения, помимо криогенного слоя, подвергаются также смотровые окна криостата (2), окна сферического бокса из лавсана (4), сферическая оболочка из полистирола (5) и стеклянный капилляр, через который осуществляется наполнение оболочки водородным топливом.



Рис. 2. Принципиальная схема ИК-нагрева через смотровые окна криостата (схема внешнего облучения): 1 – источник инфракрасного излучения; 2 – смотровые окна криостата из кварца марки «КУ-1»; 3 – окна криогенного экрана; 4 – окна сферического бокса из лавсана; 5 – сферическая полистирольная оболочка с криогенным слоем дейтерия; 6 – криогенный экран

Результаты экспериментов по выравниванию криослоя

На рис. 3 показаны результаты эксперимента по ИК-нагреву керамическим излучателем ИКН-102-0,125/230-1 мощностью 125 Вт намороженного дейтерия на внутренней поверхности сферической полистирольной оболочки диаметром 1,5 мм. Видно, что слой после нагрева через смотровые окна криостата и повторной кристаллизации заметно выровнялся, исчезли крупные неоднородности поверхности. При работе с этим источником избежать общего нагрева экспериментальной сборки не удалось, поскольку он имеет широкий спектр теплового излучения (от 2.5 до 9 мкм). Так же очевидно, что внутренняя полость бокса-кюветы не позволяет реализовать равномерное рассеяние инфракрасного излучения, ее геометрия далека от сферической, что препятствует равномерному распределению криогенного слоя внутри полистирольной оболочки при нагреве. Тем не менее, распределение льда наблюдается, и кратковременное воздействие даже неоднородным инфракрасным излучением положительно влияет на качество получаемого криогенного слоя.





Рис. 3. Сферическая полистирольная оболочка Ø1,5 мм с намороженным слоем D₂: а – до нагрева ИК-излучением; б – после нагрева ИК-излучением в течение 7 минут и проведения повторной процедуры кристаллизации слоя

На рис. 4 показаны результаты эксперимента по нагреву криогенного слоя дейтерия с помощью инфракрасного лазера. Основным его преимуществом является возможность эффективного нагрева только криослоя дейтерия, общая температура экспериментальной сборки и окружающих ее конструкционных материалов при этом возрастает незначительно. С помощью ИК-лазера в специальном экспериментальном боксе можно получить слои с разнотолщинностью не более 40 % (рис. 5).



Рис. 4. Криогенный слой дейтерия после процедуры ИК-нагрева (схема внешнего облучения)



Рис. 5. График отклонения (σ) локальной толщины криослоя от средней в зависимости от полярного угла φ (шаг по углу 10°)

Литература

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 091101.

2. Bittner D. N., Collins G. W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation // Fusion Technology. 1999. Vol. 35. P. 244.

3. Bittner D. N., Collins G. W., and Sater J. D. Generating Low Temperature Layers with IR Heating // Preprint UCRL-JC-143446, Lawrence Livermore National Laboratory, 31.03.2003.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

<u>И. М. Пискорский</u>, М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина, В. А. Юхневич, Р. В. Грачев, А. А. Савиных, М. В. Сусляков

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ активно проводятся научноисследовательские работы и испытания на радиационную стойкость материалов, элементов, приборов и узлов с использованием исследовательских ядерных установок (ИЯУ): ядерных реакторов и критических стендов [1]. Существующая аппаратура для систем управления и защиты (СУЗ) ИЯУ разрабатывалась в шестидесятых-восьмидесятых годах прошлого столетия. Назрела потребность в замене морально и физически устаревших систем с целью повышения безопасности работы ИЯУ, что можно достигнуть, в том числе путем развития функциональных возможностей электронной аппаратуры, входящей в состав СУЗ [2].

Начиная с 2010 года, сотрудники ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ работают над созданием специализированной аппаратуры для контроля нейтроннофизических параметров ИЯУ. Она активно используется при модернизации СУЗ реакторов и критических стендов института. Конкретным примером такой разработки служит унифицированный аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности (АПК ККМ), предназначенный для измерения физической мощности и скорости ее изменения. АПК ККМ входит в состав новой СУЗ стенда ГИР2-КР, введенного в эксплуатацию в 2015 году, и обеспечивает диапазоны измерения мощности ИЯУ и изменения ее периода – $(10^{-5} \div 10^6)$ Вт и $(1 \div 200)$ с, соответственно. Каналы АПК построены по блочномодульному принципу, где основной структурной единицей является контрольно-управляющий блок (КУБ). КУБ представляет собой крейт, в котором в качестве контроллера с микропроцессорным управлением используется блок обработки данных (БОД). В аппаратной части комплекса используются измерительные модули токовой камеры, измерительные модули токовой камеры логарифмические, измерительные модули счетчика нейтронов и высоковольтные преобразователи напряжения для обеспечения питанием блоков детектирования [3].

В рамках развития выбранной идеологии было решено расширить номенклатуру разрабатываемых модулей для использования при модернизации СУЗ ИЯУ. При определении назначения и функциональных возможностей вновь проектируемых устройств применялись принципы аппаратно-программного, структурного, функционального разнообразия, как одного из основных инструментов защиты от отказов [4]. Применение этих принципов обеспечивает устойчивость к отказам по общей причине, не приводит к излишнему усложнению проектирования систем на основе разрабатываемых модулей и не вызывает их сильного удорожания [5].

В результате были спроектированы или находятся на стадии разработки модуль измерения периода (МИП) разгона, модуль измерения энерговыделения (МИЭ), блок токовой защиты аппаратный (БТЗА). В них используются современные быстродействующие микросхемы, позволяющие принимать и обрабатывать большой объем данных в реальном масштабе времени, а также расширить функциональный спектр каждого модуля.

Модули могут работать автономно или в составе крейтов КУБ под управлением БОД, генерируя сигналы на срабатывание средств предупредительной и аварийной защиты при выходе значений измеряемых параметров за пределы заданного диапазона.

МИП, блок-схема которого показана на рис. 1, предназначен для аппаратного измерения установившегося периода увеличения мощности реактора (период разгона) в интервале изменения его физической мощности от 1,5 до 1000 Вт (от 5·10¹⁰ до 3,3·10¹³ дел. АЗ/с) в реальном масштабе времени.

Значение периода разгона реактора является одним из важных параметров контроля при управлении реактором. Период разгона определяется как время, в течение которого мощность реактора изменяется в $e \approx 2,71$ раз. Период разгона – величина динамическая, при неизменной мощности период разгона равен бесконечности и становится измеряемым только при изменении мощности. Период разгона определяется временем жизни одного поколения нейтронов в реакторе и значением избыточной реактивности. Для любого конкретного реактора время жизни одного поколения нейтронов есть практически постоянная величина, и период разгона определяется только значением избыточной реактивности, характеризующим степень отклонения системы от критического состояния [6].

Самым ответственным моментом управления реактором является его пуск. Главная задача обеспечения безопасности при этом в недопущении надкритичности выше установленного предела или взаимосвязанного предела по периоду увеличения мощности реактора [7].



Рис. 1. Блок схема МИП

С этой целью для установок ВНИИЭФ разработаны и аттестованы методики измерения установившегося периода разгона реактора (времени, за которое число делений в активной зоне увеличивается в *e*-раз на экспоненциальном участке разгона реактора), находящегося в надкритическом состоянии. Эти измерения проводятся на начальном этапе эксперимента для определения значения стартовой реактивности.

Алгоритм работы модуля МИП следующий. Сигнал тока с детектора поступает на преобразователь ток-напряжение, выполненный на операционном усилителе (ОУ), который преобразует его в пропорциональное значение напряжения. Коэффициент преобразования схемы задается через нагрузочные резисторы (НР). После преобразования сигнал поступает на блок компараторов.

Блок состоит из четырех компараторов (К), срабатывание которых задается с помощью подстроечных резисторов. С помощью блока компараторов выделяется интервал времени, в течение которого сила тока детектора, пропорциональная плотности потока нейтронов (физической мощности) разгоняющегося реактора, увеличивается в *e*-раз.

В начальный момент времени, при запуске модуля, на выходе компараторов устанавливается сигнал высокого уровня. Когда значение напряжения на входе превышает заданное значение, на выходе компаратора устанавливается сигнал низкого уровня. Сигналы с компараторов поступают на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) через схему согласования уровней сигналов. Сигналы запускают и останавливают 32-разрядные таймеры-счетчики. За время разгона реактора измерение периода производится дважды. Измеренное значение периода разгона реактора отображается на индикаторах на передней панели модуля и передается на верхний уровень через микроконтроллер. Для согласования уровней между индикаторами, микроконтроллером и ПЛИС используются буферные передатчики.

МИП генерирует сигналы аппаратного сброса и программного сброса при выходе значения периода нарастания мощности (разгона) за пределы разрешенных диапазонов.

Определение периода разгона происходит на 3-х поддиапазонах: от 10 мкс до 10 мс; от 1 до 999 мс; от 0,1 до 999 с. Погрешность определения на первом поддиапазоне – 2 мкс, на втором – 0.1 мс и третьем – 0,1 с. Рабочий поддиапазон выбирается вручную или с помощью программы.

МИЭ предназначен для измерения энерговыделения и выдачи сигналов в СУЗ при работе ИЯУ в статическом и квазиим пульсном режимах.

Блок-схема МИЭ показана на рис. 2.

Оперативный контроль значений энерговыделения в активной зоне реактора необходим во всех режимах работы ИЯУ, где управление осуществляется с учетом запаздывающих нейтронов. При этом решаются следующие задачи:

 – обеспечение безопасности работы реактора за счет автоматического срабатывания аварийной защиты в квазиимпульсном режиме по установленному уровню максимального энерговыделения;



Рис. 2. Блок схема МИЭ

– повышение эффективности использования реактора для экспериментальных исследований [8], за счет установленного ограничения по энерговыделению, позволяющего безопасно генерировать квазиимпульсы делений различной длительности и различной формы;

 использование измеренного значения энерговыделения при калибровке и поверке систем контроля и измерениях с применением штатных методик;

 – учет значения суммарного энерговыделения при проведении экспериментальных исследований и испытаний на радиационную стойкость.

Суммарное энерговыделение рассчитывается как полный интеграл физической мощности реактора за заданный интервал времени.

Запуск МИЭ происходит по внешнему сигналу через схему запуска. Сигнал с детектора поступает на вход усилителя (У) с регулируемым коэффициентом усиления. С усилителя он подается на вход преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), который преобразует входной сигнал в импульсы, пропорциональные напряжению и поступающие на вход ПЛИС.

В микросхеме ПЛИС происходит суммирование числа импульсов, подсчет количества импульсов за период, среднее количество импульсов. Полученные значения хранятся во внутренней памяти ПЛИС.

При наборе максимального числа импульсов, эквивалентного заданному предельному значению суммарного энерговыделения, вырабатываются аварийные сигналы.

Для чтения внутренних регистров и задания уставок ПЛИС подключается к микроконтроллеру (МК) посредством буферного передатчика, согласующего уровни напряжения на выводах микросхем.

МК предназначен для передачи команд и данных между терминальным устройством и микросхемой ПЛИС. Интерфейс связи с верхним уровнем выполнен в формате RS485.

МИЭ измеряет энерговыделение ИЯУ в широком диапазоне изменения физической мощности. На верхнем уровне происходит перерасчет измеренного количества импульсов в эквивалентное значение энерговыделения установки с учетом коэффициентов пропорциональности, учитывающих чувствительность используемых детекторов.

БТЗА, рис. 3, обеспечивает формирование сигнала аварийной защиты при превышении физической мощностью ИЯУ предельного порогового значения на аппаратном уровне без временных задержек.

Для обеспечения безопасности ИЯУ возможность срабатывания систем аварийной защиты в течение времени, сравнимого со временами жизни мгновенных нейтронов (10⁻⁷ – 10⁻³ с), было бы решением многих проблем [7]. Цель разработки БТЗА – максимально сократить временную задержку выработки аварийного сигнала при превышении заданного значения мощности.

Сигнал с детектора поступает на вход модуля и преобразуется в пропорциональное значение напряжения так же, как в модуле МИП, но при этом коэффициенты усиления ОУ могут задаваться как в ручном режиме, так и дистанционно, по командам с терминального устройства. Режим управления модуля задается аппаратно, переключателем на передней панели.

Далее преобразованный сигнал поступает на вход компаратора, уровень срабатывания которого задается специально настраиваемым резистором. Уставка срабатывания компаратора определяется при проведении физического пуска реактора. При срабатывании компаратора, сигнал поступает на формирователь аварийного сигнала (ФАС), построенного на триггере и реле. ФАС предназначен для формирования сигнала срабатывания аварийной защиты (АЗ).

Сигнал АЗ сохраняется даже после снижения мощности реактора до рабочих значений. Сброс может быть произведен программно, по команде с терминального устройства, либо аппаратно, по нажатию кнопки на передней панели модуля.



Рис. 3. Блок-схема БТЗА

Для каждого модуля разработана система команд. Набор команд каждого модуля одинаков, отличается только длина поля данные, см. таблицу.

Формат д	анных
----------	-------

&	AA	BB	CC	EE	FF	CR
старт	адрес	команда	дан	ные	Контр. сумм.	конец

В общем случае, формат сообщений следующий:

1. Для установки параметров и данных:

Запрос: &AABBCC...EEFF<CR>;

Ответ: \$AABBCC...EEFF<CR>,

где & – признак начала сообщения запроса (символ '&'); \$ – признак начала сообщения ответа (символ '\$'); AA – адрес (номер) модуля на внутренней шине; 'BB' – номер регистра команды (старший бит является признаком чтения или записи в модуль); CC...EE – данные в коде HEX; CC – контрольная сумма; <CR> - признак окончания команды.

К служебным командам относятся изменения адреса модуля, чтения версии программного обеспечения, запрос информации о модуле.

Команды запроса формируются на верхнем уровне, ответы формируются функциональными модулями. Скорость передачи данных составляет 115200 бит/с, при этом вероятность ошибки при передаче сигналов составляет 0,2 %.

Заключение

Таким образом, разработка и внедрение многофункциональных аппаратно-программных модулей для модернизации аппаратуры СУЗ ядерных реакторов и критических стендов во ВНИИЭФ продолжаются.

Использование новых модулей повышает уровень безопасности работы ИЯУ за счет реализации принципа разнообразия измерительных средств и расширяет диапазоны измерения физических параметров излучения ИЯУ.

На текущий момент собраны первые версии аппаратных частей перечисленных в докладе модулей, на которых разрабатывается и отлаживается управляющее программное обеспечение. В процессе отладки выявляются недостатки в применяемых схемотехнических решениях и вносятся изменения в конструкторскую документацию. На следующем этапе планируются проведение стендовых испытаний модулей на ИЯУ и использование их в составе каналов контроля физических параметров излучения ИЯУ при модернизации СУЗ.

Литература

1. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ ВНИИЭФ. 65 лет ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергий. Научное издание в 2-х выпусках. Вып. 1 // Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 335.

2. Заикин А. А., Портнягин А. Ю. Современный интегрированный комплекс аппаратуры системы управления и защиты исследовательских реакторов // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2004. № 3. С. 11–24.

3. Воинов М. А., Гунин С. В., Дроздов Ю. М. и др. Аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности исследовательских ядерных установок // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 4. С. 123–128.

 4. ГОСТ Р МЭК 61513-2011. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. Москва. 2011.

5. Алпеев А. С. Диверсные защиты. Разнообразия при проектировании аварийных защит атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. 2015. Т. 76. № 2. С. 1–4.

6. Беденко С. В. Основы управления нейтронным полем в ядерном реакторе: учебное пособие // С. В. Беденко, В. Н. Нестеров, И. В. Шаманин; Томский политехнический университет. – Томск: Томский Политехнический Университет, 2009. С. 176.

7. Юркевич Г. П. Система управления ядерными реакторами: Принципы работы и создания // Под ред. акад. РАН Хлопонина Н. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭЛЕКС–КМ, 2009. С. 448.

8. Мамаев Д. В., Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Пичугин А. М. Реактор БИГР // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой конференции. Т.1 // Под ред. С. В. Воронцова – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2016. С. 77–86.

ДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОСТИ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э635 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А. В. Седов, А. Е. Шестаков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Проведены дифракционные измерения на циркониевом сплаве Э635 в диапазоне давлений от нормального до 11 ГПа при комнатной температуре. Получены данные по сжимаемости α -фазы. Определено сосуществование в сплаве в условиях эксперимента в разном объемном соотношении α и ω модификаций циркония в диапазоне давлений от 6,9±0,3 до 10,9±0,3 ГПа. Проведено сравнение объема, приходящегося на один атом α - и ω -фаз.

Введение

Циркониевый сплав Э635 является перспективным материалом для использования в качестве оболочек твэлов. Структура сплава Э635 гетерофазна и представляет собой α -Zr матрицу с равномерно распределенными в ней частицами интерметаллидов (Zr, Nb)2Fe и Zr(Nb,Fe)2[1]. Для расчетов поведения материала при высоких давлениях и температурах, а также прогнозирования поведения в сложных условиях эксплуатации и возможных аварийных ситуаций необходимо учитывать наличие α - ω фазового перехода.

Данная работа сделана с целью получения экспериментальных данных о α-ω фазовом переходе в сплаве Э635 при статическом сжатии.

Образец и постановка эксперимента

Измерения произведены на рентгеновском дифрактометре, оснащенном двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором типа Imaging Plate. Источником рентгеновского излучения являлась молибденовая трубка с графитовым монохроматизатором (Мо-К α излучение $\lambda = 0.711$ Å). Для всестороннего сжатия образца использовалась ячейка с алмазными наковальнями DAC (Diamond Anvil Cell) типа Boehler-Almax с диаметром кулет 600 мкм. Ячейка, с помощью дополнительной оснастки размещалась на оси коллиматора таким образом, чтобы исследуемое вещество было в центре гониометра. Расстояние от центра гониометра до детектора было выбрано 180 мм. При радиусе детектора 170 мм обеспечивался диапазон регистрации углов дифракции от нуля до 44°. Хотя это чуть меньше чем угол раствора ячейки 45°, но практически, из-за малой интенсивности, использовались данные до 20 ~35°. Схема проведения измерений представлена на рис. 1.

До начала измерений между алмазными наковальнями была помещена пластина (далее – гаскета) из сплава инконель толщиной около 200 мкм. Эта пластина обжималась алмазами до толщины около 100 мкм, после чего в полученном отпечатке с помощью микродриллера электроэрозионным методом изготавливалось отверстие диаметром 200 мкм. В получившуюся таким образом в гаскете цилиндрическую полость высотой около 100 мкм и диаметром 200 мкм помещалось некоторое количество соли NaCl высокой степени чистоты (≥99,999 %). Соль NaCl выбрана в качестве наполнителя потому, что ее одновременно можно использовать и как среду, передающую давление от алмазных наковален исследуемому веществу, и как датчик давления [2].

От массивного диска исследуемого металла (сплава) с помощью надфиля было напилено некоторое количество стружки. Далее под микроскопом из этой стружки были выбраны образцы для исследования в виде фрагментов размером около 100 мкм, которые размещались в цилиндрической полости гаскеты, где уже находилось некоторое количество соли NaCl. Оставшееся свободное пространство над образцом также было заполнено солью.



Рис. 1. Схема проведения измерений

Шаг, с которым осуществлялось сближение алмазных наковален, был выбран исходя из опыта предшествующих измерений, и варьировался от 1/8 до 1/4 оборота рукоятки DAC. При таком повороте наковальни сближались примерно на 5–15 мкм за шаг, соответственно. После каждого шага производилось по одному дифракционному измерению. Экспозиция каждого измерения составляла 60 минут. Съемка проводилась при значениях напряжения 50 кВ и тока рентгеновской трубки 40 мА. После каждого измерения с использованием программного обеспечения дифрактометра производилось преобразование двумерного изображения в дифракционный спектр. В результате, для каждого эксперимента были получены дифракционные спектры при различных значениях давления.

Величина давления определялась по изменению объема элементарной ячейки NaCl [2], который был рассчитан из экспериментальных угловых положений брэгговских пиков. Относительная погрешность определения объема элементарной ячейки хлорида натрия изменялась от измерения к измерению и имела характерное значение $\Delta V/V \approx 0,002$. Соответственно, погрешность определения давления имела характерное значение $\Delta P \approx 0.3$ ГПа.

Экспериментальные результаты

Первоначально было произведено дифракционное измерение на сплаве Эб35 в исходном состоянии при нормальных условиях и без ячейки высокого давления (рис. 2). В сплаве обнаруживается только а-модификация циркония, дифракционные пики интерметаллидов отсутствуют. Для а-фазы в исходном состоянии были определены параметры кристаллической решетки $a_{\alpha} = 3,232\pm0,002$ Å, $c_{\alpha} = 5,146\pm0,003$ Å и объем элементарной ячейки $V_{\alpha} = 46,57\pm0,08$ Å³. Полученные результаты в пределах погрешности совпадают с данными для чистого циркония [3].



Рис. 2. Исходное состояние сплава Э635. Нормальные условия. Без ячейки высокого давления. Приведены индексы Миллера α-фазы

Серия дифрактограмм сплава Э635 в диапазоне давлений в DAC от нормального до 11 ГПа представлена на рис. 3. Начиная примерно с 7 ГПа происходит

рост интенсивности дифракционного максимума ω фазы (110) в области $2\theta \approx 16,2^{\circ}$ и одновременное уменьшение пика α -фазы Zr (101) в области $2\theta \approx 16,6^{\circ}$.

Участки рентгенограмм при давлении 0,4, 8,5 и 11 ГПа, наиболее хорошо демонстрирующие происходящий в материале $\alpha \rightarrow \omega$ фазовый переход, приведены на рис. 4. Стрелками показано смещение линий при повышении давления.



Рис. 3. Изменение рентгеновской дифракционной картины от циркониевого сплава Э635 с увеличением давления



Рис. 4. Участки рентгенограмм циркониевого сплава Э635 при различных давлениях. Стрелками показано смещение дифракционных пиков фаз при изменении давления. Дифракционные линии от материала гаскеты смещаются крайне слабо

Интенсивность дифракционных максимумов α -фазы уменьшается с повышением давления, а ω -фазы – увеличивается.

Результаты измерений интенсивности дифракционных максимумов с индексами Миллера (101) α и (110) ω -фаз в сплава Э635 в зависимости от давления показаны на рис. 5. Начиная примерно с 7 ГПа происходит рост дифракционного пика (110) ω -фазы и одновременное уменьшение пика (101) α -фазы Zr, что связано с изменением объема α - и ω -фаз.



Рис. 5. Изменение абсолютной интенсивности дифракционных максимумов (101) α-фазы и (110) ω-фазы циркония в сплаве Э635, с увеличением (α-Zr(101) – круг, ω-Zr(110) – квадрат) и уменьшением давления (ω-Zr(110) – треугольник)

Таким образом, можно говорить о сосуществовании в сплаве Э635 в условиях эксперимента в разном объемном соотношении α и ω модификаций циркония в диапазоне давлений от 6,9±0,3 до 10,9±0,3 ГПа. Давление, при котором начинается $\alpha \rightarrow \omega$ фазовое превращение при статическом сжатии в сплаве Э635 выше, чем в чистом цирконии [3,4]

Увеличение давления было остановлено при значении 11 ГПа. Затем была осуществлена разгрузка ячейки высокого давления. На участке уменьшения давления были произведены еще три дифракционных измерения при значениях давления 7,1 ГПа, 1,5 ГПа и близкого к нормальному (см. рис. 5). При уменьшении давления до нормального обратный $\omega \rightarrow \alpha$ переход не происходит как и в чистом цирконии [3, 4].

После полной разгрузки частица сплава размером около 100 мкм была извлечена из ячейки и на ней было произведено дифракционное измерение (рис. 6), по которому удалось определить параметры решетки ω -фазы при нормальном давлении. Они имели значения $a_{\omega} = 5,054\pm0,005$ Å, $c_{\omega} = 3,129\pm0,003$ Å. Таким образом, был определен объем элементарной ячейки омега фазы при нормальном давлении $V_{\omega} = 9,21\pm0,18$ Å³, а объем, приходящийся на один атом $V_{0\omega}=23,07\pm0,06$ Å³, меньше объема, приходящегося на один атом в альфа фазе $V_{0\alpha}=23,29\pm0,04$ Å³. Уменьшение объема, приходящегося на один атом, составило 1 %. Это близко к аналогичной величине, полученной для чистого циркония [4].

Измерение координат дифракционных максимумов α-фазы сплава Э635 позволило получить зависимость объема элементарной ячейки от давления. Она приведена на рис. 7. Там же показаны аналогичные данные для чистого циркония [4]. Аппроксимация экспериментальных данных позволила оценить величину изотермического модуля объемной упругости при нормальных условиях для α-фазы в сплаве Э635, К_{Э635} ≈ 100ГПа. Она приблизительно на 10 % больше значения, полученного для чистого циркония [4].



Рис. 6. Дифрактограмма образца из сплава Э635 после разгрузки ячейки. Нормальные условия. Вне ячейки высокого давления. Материал остался в ω-фазе. Приведены индексы Миллера линий ω-фазы.



Рис. 7. Зависимость объема элементарной ячейки α-фазы в сплаве Э635 от давления (круги). Треугольниками показаны экспериментальные данные для α-фазы чистого циркония из работы [4]

Выводы

По результатам дифракционных измерений сплава Э635 можно говорить о сосуществовании в сплаве в разном объемном соотношении α - и ω - модификаций циркония в диапазоне давлений от (6,9±0,3) до (10,9±0,3) ГПа. Давление, при котором начинается α - ω фазовое превращение при статическом сжатии в сплаве Э635 выше, чем в чистом цирконии. Изотермический модуль объемной упругости при нормальных условиях для α -фазы в сплаве Э635 на 10 % больше значения, полученного для чистого циркония и имеет величину К₂₆₃₅≈100 ГПа.

Литература

1. Nikulina A. V., Markelov V. A., Peregud M. M. et al. Zirconium alloy E635 as a material for fuel rod

cladding and other components of VVER and RBMK cores. Zirconium in the Nuclear Industry: Eleveth International Symposium. ASTM STP 1295. 1996. P. 785–804.

2. Decker D.L. High-Pressure Equation of State for NaCl, KCl and CsCl // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 3239.

3. Olinger B., Jameison J. C. // High Teph. High Pres. 1073. Vol. 5. P. 123–131.

4. Zhao, Zhang, Pantea, Qian, Daemen, Rigg, Hixson, Greeff, Gray III, Yang, L. Wang, Y. Wang, Uchida. «Thermal Equations of State of the α -, β -, and ω -Phases of Zirconium».

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С ГИДРОКАРБОНАТОМ НАТРИЯ

<u>И. А. Спирин</u>, А. А. Седов, А. А. Шалыгин, О. В. Шевлягин

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

В работе приведены результаты исследования детонационных характеристик (скорости и критической толщины детонации) малоплотных взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия (пищевая сода, NaHCO₃). Получены зависимости указанных детонационных характеристик от размера частиц и массовой доли соды во взрывчатых смесях с высокодисперсным (ВДТС) и крупнодисперсным тэном (TC). Подтверждена оптимальность выбора массовой доли соды в смеси с высокодисперсным тэном, применительно к использованию состава для сварки взрывом тонких слоев металлов. Для данного состава построена зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ смесевое разработано взрывчатое вещество (ВВ), в котором используются высокодисперсный тэн и инертная добавка – гидрокарбонат натрия в массовом соотношении 35 %/ 65 % соответственно. Это ВВ обладает уникальным свойством: при наличии большого количества инертной добавки детонировать со скоростью $D\approx 2$ км/с ($\rho\approx 0.7$ г/см³) в слое толщиной ≈2 мм [1]. Основным назначением данного ВВ является использование его для сварки взрывом тонких (<2 мм) слоев металлов [2].

Целью данной работы является развитие данного направления работ в части более широкого изучения влияния на детонационные свойства малоплотных взрывчатых смесей тэна с содой таких параметров как дисперсность взрывчатого наполнителя и инертной добавки, а также соотношения их массовых долей в BB, которые в конечном счете позволят оптимизировать смесевое взрывчатое вещество применительно к сварке взрывом.

Результаты работы по определению газодинамических характеристик получены с использованием радиоинтерферометрического метода исследования быстропротекающих процессов [3].

Постановка опытов по определению скорости и критической толщины детонации

Объектом исследований являлись смеси тэна с содой с различными массовыми долями добавки (α , %)

и с различной удельной поверхностью $(S_{yg} cm^2/r)$ тэна и соды насыпной плотности.

Схема экспериментальных сборок представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальных сборок: 1 – ЭД; 2 – пластина ПТ; 3 – алюминиевая фольга; 4 – планка из пенопласта; 5 – исследуемое ВВ; 6 – плоский облучатель радиоинтерферометра

ВВ насыпной плотности размещали в планки из пенопласта 4 с полостью шириной 30 мм, длиной 80 мм. Толщина стенок планки – 4 мм. Высота насыпаемого в планку ВВ (*H*, мм) варьировалась. При таком размещении насыпного ВВ его плотность в рамках погрешности (0,02 г/см³) совпадала с насыпной.

Инициирование исследуемого BB 5 осуществляли путем подвода детонации пластиной из пластифицированного тэна (ПТ) 2. Алюминиевая фольга 3 выполняла роль экранировки исследуемого процесса от детонации пластин ПТ при регистрации радиоинтерферометром.

С помощью радиоинтерферометра ПРИ-03 (длина волны 3,2 мм) регистрировали интерферограммы движения детонационной волны (ДВ) в исследуемом ВВ, при обработке которых получали *x-t* диаграммы движения ДВ. По динамике движения ДВ определяли характер процесса (затухающий или нет). Наименьшую толщину слоя, при котором в ВВ возникала детонация с постоянной скоростью, считали критической ($H_{\rm kp}$, мм), соответствующую ей среднюю скорость детонации – критической ($D_{\rm kp}$, м/с). Дальнейшее уменьшение толщины слоя приводило к затуханию ДВ.

Среднюю скорость детонации (D, м/c) определяли путем аппроксимации *x-t* диаграммы линейной функцией. Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой равен значению средней скорости детонации. Относительная погрешность измерения D не превышала 3 %.

Типичные интерферограммы без затухания и с затуханием детонации представлены на рис. 2,а и б соответственно.



Рис. 2. Интерферограмма детонации и затухания детонации ВВ ВДТ-сода, α = 90 %, H = 9 мм: а – детонация, б – затухание детонации

Типичные x-t диаграммы, полученные в опытах, и пример их аппроксимации представлены на рис. 3.



Рис. 3. *X-t* диаграммы, полученные в опытах: a – детонация ВВ ВДТ – сода, $\alpha = 90$ %, D = 920 м/с, H = 9 мм; b – затухание детонации ВВ ВДТ-сода, $\alpha = 90$ %, H = 8 мм

Зависимость критической толщины детонации ВВ ТС 35/65 (тэн-сода 35/65) и ВДТС 35/65 от размера частиц NaHCO₃

Исследовались ВВ ТС 35/65 ($D \approx 2$ км/с, $H_{\rm kp} \approx 10$ мм, при $\rho \approx 1$ г/см³) и ВДТС 35/65 ($D \approx 2$ км/с, $H_{\rm kp} \approx 2$ мм, при $\rho \approx 0.7$ г/см³), которые ранее [1] были использованы для сварки взрывом.

В работе [4] показано существование оптимального размера частиц добавки, при которой критический диаметр детонации был минимальным, а значит существует возможность уменьшения критической толщины детонации составов ВДТС 35/65 и ТС 35/65 за счет изменения размеров частиц. Реализуя данный подход, можно ожидать уменьшение критической толщины детонации ВВ ТС 35/65, вплоть до толщин, позволяющих использовать данный состав для сварки взрывом тонких металлических пластин.

Для составов ВДТС 35/65, ТС 35/65 насыпной плотности определена зависимость критической толщины детонации от размера частиц NaHCO₃ (δ , мкм), характеризуемых удельной поверхностью. У дельная поверхность определялась на приборе типа прибора Товарова. Гранулометрический состав NaHCO₃, полученный путем рассева на ситах, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав NaHCO3

δ, мкм	Массовая доля, %
от 0 до 40	9,6
от 40 до 71	24,2
от 71 до 100	13,2
от 100 до 125	10,2
от 125 до 160	13,6
от 160 до 250	22
от 250 до 355	6,8
от 355 до 400	0,2
от 400	0,3

Результаты опытов представлены в табл. 2.

По данным табл. 2 построена зависимость критической толщины детонирущего слоя ВВ ВДТС 35/65 и ТС 35/65 от величины удельной поверхности добавки NaHCO₃ (см. рис. 4).



Рис. 4. Зависимость $H_{\kappa p}$ от S_{yg} NaHCO₃ для ВВ ВДТС 35/65 и ТС 35/65

Обозначение		$S_{ m yg},{ m cm}^2/{ m r}$		<i>H</i> _{кр} , мм	Dкр, м/с
BB	тэн	эн NaHCO ₃			
	4500	1450 (δ < 40 мкм)	0,56	2	1440
		970 (40 < δ < 71 мкм)	0,65	1,5	1430
ВДТС 35/65		660 (полный гранулометриче- ский состав)	0,68	1,5	1630
		420 (160 < δ < 250 мкм)	0,68	1,5	1680
TC 35/65	500	1450 (δ < 40 мкм)	1	*40	1230
		970 (40 < δ < 71 мкм)	1,05	29	1340
		660 (полный грануло- метрический со- став)	1,02	12	1220
		420 (160 < δ < 250 MKM)	1,08	8	1100

Критическая толщина ВВ в зависимости от размера частиц NaHCO₃

 $H_{\rm kp}$ ВДТС 35/65 при уменьшении размера частиц добавки растет не значительно с 1,5 до 2 мм во всем исследованом диапазоне. Рост $H_{\rm kp}$ ТС 35/65 с 8 до 40 мм с уменьшением б может быть связан с эффектом экранирования кристаллов тэна. Мелкие частицы соды окружают кристалл тэна, тем самым, создают экран, защищающий кристал как от УВ, так и от ПВ. УВ и/или ПВ требуется большее время на передачу энергии сжатием или конвективным поджигом, что и определяет $H_{\rm kp}$. Для ВДТС 35/65 такого эффекта не обнаружено, по видимому, из-за значительно меньших размеров кристалов ВДТ (≈4 мкм) по сравнению с NаНСО₃. Частицы ВДТ будут расположены близко к друг другу в порах, образованных частицами NаНСО₃.

Для BB TC 35/65 путем уменьшения удельной поверхности (увеличения размера частиц соды) удалось уменьшить критическую толщину детонации в 1,5 раза (относительно добавки с полным гранулометрическим составом). Не исключено, что использование более крупных частиц соды ($\delta > 250$ мкм) позволит еще уменьшить критическую толщину. Однако, для этого потребуется выполнить поиск путей укрупнения частиц NaHCO₃.

Зависимость критической толщины насыпного слоя и скорости детонации ВВ от массовой доли соды в смеси с ВДТ

Результаты опытов представлены в табл. 3.

По данным табл. 3 построены графики зависимости критической толщины и скорости детонации ВВ ВДТ-сода от массовой доли соды в смеси (см. рис. 5). Значение D при $\alpha = 0$ % взято из работы [5].

Критическая толщина и скорость детонации ВВ ВДТС при различной массовой доли содержании лобавки

α, %	$S_{ m yg},~ m cm^2/\Gamma$		0 E/01/ ³	H _{кр} ,	<i>D</i> _{кр} ,	D_{np} ,
	ВДТ	NaHCO ₃	р, т/см	MM	м/с	м/с
90	4500	4500 660	0,98	9	920	-
85			0,92	3	1150	1410
75			0,79	2	1510	1720
65			0,68	1,5	1630	2060
55			0,61	1,4	1850	2540
15			0,39	0,7	2900	3090

D_{пр} –предельная скорость детонации, м/с



Рис. 5. Графики зависимосией $H(\alpha)$ и $D(\alpha)$

Из рис. 5 видно, что в интервале 15 % < α < 85 % критическая толщина детонирующего слоя с увеличением массовой доли соды возрастает от 0,7 мм до 3 мм, а при α > 85 % происходит более резкий рост критической толщины слоя до 9 мм.

Скорость детонации монотонно возрастает от 1400 м/с до 3300 м/с при уменьшении α от 85 % до 15 %.

Таким образом, путем изменения массовой доли добавки в ВВ можно варьировать в широких пределах скорость детонации, при этом критическая толщина детонации остается в разы меньше, чем для большинства промышленных ВВ.

На основе полученных данных выбран оптимальный состав для сварки взрывом тонких металлических пластин.

При использовании для сварки взрывом схемы с параллельным расположением метаемой и неподвижной пластин, скорость точки контакта совпадает со скоростью детонации заряда ВВ, $V_k = D$. Экспериментально определенная область скоростей соударения, при которой имеет место устойчивое и прочное сварное соединение находиться в интервале 2,0 км/с $\leq V_k \leq 2,3$ км/с [6]. Для удовлетворения этого требования можно использовать составы в интервале массовой доли добавки 58 % $\leq \alpha \leq 68$ %. Как видно, выбранная раннее рецептура с $\alpha = 65$ %, является практически оптимальной.

Зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя ВВ ВДТС 35/65

ВВ ВДТ-сода с $\alpha = 65 \%$ (ВДТС35/65) непосредственно применяется для сварки взрывом тонких металлических пластин, где требуется устойчивая детонация ВВ в слоях толщиной от 10 мм и менее, в связи с чем, для этого ВВ подробно определена зависимость D(H).

Результаты опытов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Толщина насыпного слоя и скорость детонации ВВ ВДТС 35/65

$S_{\rm yg},{ m cm}^2/{ m r}$		$a p/au^3$	<i>U</i> , , , , ,	D M/a	
ВДТ	NaHCO ₃	р, т/см	11, мм	<i>D</i> , M/C	
			1,5	1650	
			1,5	1620	
			2	1700	
	660	0,70±0,02	2	1750	
			2,5	1810	
4500			3	1860	
			3	1950	
			3,5	1920	
			4	2000	
				4,5	1930
			5	2010	
			6	1990	
			6	1960	

По данным табл. 4 построен график зависимости скорости детонации от толщины слоя ВВ ВДТС 35/65 (см. рис. 6).



Рис. 6. График зависимости D(H) для ВВ ВДТС 35/65

Из рис. 6 видно, что для исследованного BB вид зависимости D(H) не имеет каких-либо особенностей (например, излом зависимости D(H)) характерных для сильноразбавленных BB [4].

Данные аппроксим ировались выражением:

 $D(M/c) = -1268 \cdot exp(-H(MM)/1,24) + 2001, 1,5 \le H \le 6$ (1)

За критическую толщину детонации принимали максимальную толщину слоя BB, при которой про-

цесс детонации все еще оставался стационарным. Таким образом критическая толщина и скорость детонации ВВ ВДТС 35/65 при $\rho=0,07$ г/см³ составила 1,5 мм и (1630±30) м/с соответственно, предельная толщина и скорость ≈ 6 мм и (1990±40) м/с соответственно.

Заключение

Проведены исследования детонационных характеристик взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия с помощью радиоинтерферометрического метода.

Определено влияние на критическую толщину детонации насыпных слоев BB TC 35/65 ВДТС 35/65 размера частиц добавки NaHCO₃. Критическая толщина детонирующего слоя ВВ ВДТС 35/65 при уменьшении размера частин добавки растет не значительно с 1,5 до 2 мм во всем исследованом диапазоне. Рост критической толщины детонирующего слоя ТС 35/65 от 8 до 40 мм с уменьшением размера частиц добавки может быть связан с эффектом экранирования кристаллов тэна.

Для ВВ ТС 35/65 путем уменьшения удельной поверхности от 660 до 420 см²/г (увеличения размера частиц) добавки удалось уменьшить критическую толщину детонации в 1,5 раза.

Определена скорость и критическая толщина детонации в смесях ВДТ с содой в различных соотношениях массовых долей. Критическая толщина детонации в интервале изменения массовой доли добавки от 15 до 90% возрастает с 0,7 до 9 мм, при этом скорость детонации возрастает монотонно от 1400 до 3300 м/с

На основе полученных результатов определен диапазон массовой доли добавки в смеси с ВДТ, подходящий к использованию ВВ для сварки взрывом тонких металлических пластин – 58 % $\leq \alpha \leq 68$ %. Оптимальной является рецептура с $\alpha = 63$ %. Выбранная ранее рецептура ВДТС 35/65 ($\alpha = 65$ %) близка к оптимальной.

Для ВВ ВДТС 35/65 используемого для сварки взрывом тонких металлических пластин, получена зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя, которая аппроксимируется выражением:

$$D(M/c) = -1268 \cdot \exp(-H(MM)/1,24) + 2001, 1,5 \le H \le 6$$

Критическая толщина и скорость детонирующего слоя при плотности 0,7 г/см³ составила 1,5 мм и (1630±30) м/с соответственно, предельная толщина и скорость \approx 6 мм и (1990±40) м/с соответственно;

Литература

1. «Перспективное ВВ для сварки взрывом тонких металлических фольг» Л. А. Андреевских, А. А. Дерибас и др. XIII Харитоновские чтения. Сборник статей. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 89–92. 2. Андреевских Л. А., Дроздов А. А., Михайлов А. Л., Самароков Ю. М., Скачков О. А., Дерибас А. А. Исследование возможности создания сваркой взрывом биметаллических композиционных материалов высокожаростойкая порошковая сталь-медь // Сталь, 2015, № 1. С. 84–87.

3. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Монография под редакцией А. Л. Михайлова. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 218–254. 4. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. І. Влияние инертной добавки на параметры детонации // ФГВ. 1979. № 3. С. 92–101.

5. Борзых М. Н., Кондриков Б. Н. Обобщенная зависимость скорости детонации вторичных ВВ от плотности заряда // ФГВ. 1978. № 1. С. 117–122.

6. Дерибас А. А. // Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ ТОКА С РЕБРИСТОЙ ПРЕГРАДОЙ

<u>Д. А. Тепаев</u>, С. А. Казаков, А. А. Агапов, Ю. В. Власов, В. А. Демидов, С. И. Володченков

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

Введение

Для инициирования протяженных цилиндрических разрывных зарядов взрывных размыкателей тока (ВРТ) применяются устройства инициирования (УИ) в виде цепочки электродетонаторов типа Д-22. На конференции «Молодежь в науке» 2017 г. А. А. Агаповым доложено о разработке такого УИ, формирующего расходящуюся цилиндрическую ударную волну с разновременностью фронта ~ 0,2 мкс, и предложено использовать его в полномасштабных опытах с ВРТ [1].

Испытание по обострению импульса тока многоэлементного дискового ВМГ с помощью ВРТ диаметром 600 мм и длиной 700 мм [2] показало, что сопротивление размыкателя составило ~14 мОм. Относительно малая величина сопротивления размыкателя и утечки тока по размыкаемому участку ВРТ привели к уменьшению амплитуды тока в нагрузке по отношению к расчетному значению. Чтобы повысить сопротивление ВРТ, предлагается применить в размыкателе дугогасящую среду, снижающую температуру плазменных образований, возникающих при электровзрыве участков проводника в пазах ребристой преграды, растянутых продуктами детонации разрывного заряда. Например, полость ВРТ можно заполнить элегазом (SF₆) [3] под давлением. Другой путь – в местах, где происходит электрический взрыв проводника, использовать продукты детонации дополнительного заряда взрывчатого вещества (ВВ).

В докладе приведены результаты газодинамических расчетов работы ВРТ с преградой, ребра которой облицованы пластическим ВВ, а также данные, полученные в проведенных взрывных экспериментах.

Газодинамические расчеты ВРТ со стальными кольцами, облицованными ПВВ

Ребристая преграда взрывного размыкателя тока (рис. 1) принципиально представляет собой периодическую структуру, состоящую из одинаковых размыкающих элементов в виде ребер и пазов между ними [1, 4]. Один такой элемент выделен пунктирной линией на рис. 1. При детонации разрывного заряда одни участки разрушаемого проводника (фольги) задерживаются на ребрах преграды, а другие участки разгоняются в пазах. При этом проводник многократно растягивается, а под воздействием протекающего тока происходит электрический взрыв проводника в местах его утоньшения.

Если на ребрах расположить взрывчатое вещество, то под воздействием ударной волны от разрывного заряда ВВ сдетонирует, и продукты детонации заряда будут воздействовать на продукты электровзрыва фольги.

Для проверки работоспособности предложенной конструкции проведены сравнительные газодинамические расчеты элементов ВРТ без ВВ на ребрах преграды и с облицовкой ребер пластическим ВВ. В расчетах варьировались ширина ребер и пазов, толщина ВВ на ребрах преграды.



Рис. 1. Размыкатель с ребристой преградой: 1 – фольга; 2 – металлические кольца; 3 – разрывной заряд; 4 – дополнительный заряд BB

В таблице приведены данные о конструкции элемента ВРТ с дополнительным зарядом ВВ, выбранного для проведения экспериментальной проверки, результаты расчетов этого размыкателя и аналогичные данные по такому же элементу, но без дополнительного заряда. Ребро из стали имеет ширину 1,5 мм и толщину 1,2 мм. Ребро по наружной поверхности облицовано полоской ВВ из состава ПТ-83 сечением $1,5 \times 1,2$ мм², ширина паза – 3 мм, толщина разрушаемого проводника из меди – 0,3 мм.

		1 2	L		
Номер	δ,	Конструкция	Ширина и тол-	Ζ,	<i>t</i> _n , мкс
расчета	MM	peópa	щина ребра, мм	MM	P 2
11315	0,3	Fe	1,5×1,2	3	1,5
11323	0,3	Fe + ПВВ 1,5мм	1,5×1,2	3	1,3

Условия и результаты расчетов ВРТ

 δ – толщина фольги, d – ширина и толщина ребра, z – ширина паза, l_p – время от момента выхода детонационной волны на поверхность фольги до ее видимого разрыва. На рис. 2 показаны картины состояния ВРТ в разные моменты времени, полученные в сравнительных расчетах. Видно, что при наличии ВВ на ребре ВРТ процесс разрыва фольги происходит быстрее, чем в размыкателе без ВВ.



Рис. 2. Сравнительная картина работы ВРТ с ВВ (расчет № 11323 – слева). и без ВВ (расчет № 11315 – справа) после выхода детонационной волны на фольгу: а – через 0,1 мкс; б – через 0,5 мкс; в – через 1,3 мкс; г – через 1,7 мкс

Результаты взрывных экспериментов

В ходе первого эксперимента объектом исследований являлся взрывной размыкатель тока диаметром 100 мм (ВРТ-100), выполненный в виде набора стальных колец, облицованных полосками из пластического ВВ. Общий вид устройства представлен на рис. 3.

В состав испытанного устройства входят:

- спиральный ВМГ;
- BPT;
- индуктивная нагрузка.

ВРТ-100 состоит из устройства инициирования, промежуточного заряда ВВ, внутреннего токопровода, изолятора, разрывного заряда ВВ, разрушаемой фольги, преграды и внешнего токопровода. Разрушаемый проводник выполнен из медной фольги толщиной 0,28 мм в виде цилиндра диаметром 100 мм длиной 100 мм. Длина разрушаемого участка фольги 92 мм. Преграда ВРТ представляла собой набор стальных колец шириной 1,5 мм и толщиной 1,2 мм. Расстояние между кольцами 3 мм. Снаружи стальные кольца облицованы полосками пластического ВВ из состава ПТ-83 толщиной 1,5 мм (см. вид А на рис. 3).

При разрываемом токе спирального ВМГ 2,8 МА получены осциллограммы, представленные на рис. 4 и 5.

В нагрузке индуктивностью ~10 нГ н сформирован импульс тока амплитудой 2,1 МА с временем нарастания 1,2 мкс. Сопротивление ВРТ составило ~70 мОм.

Во втором опыте, проведенном при большем разрываемом токе спирального ВМГ (~5,5 МА), испытывался ВРТ диаметром 100 мм, выполненный в виде преграды из органического стекла с ребрами шириной 1,5 мм и пазами шириной 3 мм с облицовкой ребер стальными кольцами шириной 1,5 мм и толщиной ~1 мм. Разрушение медной фольги толщиной 0,28 мм длиной 100 мм происходило с помощью заряда ВВ из состава ОФА-6У. Внутренние полости ВРТ и спирали заполнены газом SF_6 при давлении 4,2 атм.

В эксперименте получены осциллограммы, представленные на рис. 6 и рис. 7.



В нагрузке индуктивностью ~10 нГн сформирован импульс тока амплитудой ~4 МА со временем нарастания ~ 1,2 мкс. Сопротивление ВРТ составило ~34 мОм.

В обоих взрывных экспериментах полученные значения сопротивления ВРТ выше, чем в эксперименте с дисковым ВМГ и ВРТ.

Выводы

В результате работы показано, что для уменьшения проводимости взрывного размыкателя необходимо применять дугогасящие среды, снижающие температуру плазменных образований, возникающих при электровзрыве участков проводника в пазах ребристой преграды, растянутых продуктами детонации разрывного заряда.

Экспериментально подтверждена возможность повышения сопротивления ВРТ за счет применения в размыкателе элегаза и ВВ над ребристой преградой для охлаждения и рассеивания плазменных образований.

Литература

1. Агапов А. А., Борискин А. С., Володченков С. И. и др. Устройство осевого инициирования цилиндрических зарядов взрывчатого вещества. // Сборник тезисов докладов XVI научно-технической конференции 25–27 октября 2017 г. С.31.

2. Власов Ю. В., Демидов В. А., Борискин А. С. и др. Устройство импульсной мощности на основе дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ240 с взрывным размыкателем тока // В кн.: Проблемы физики высоких плотностей энергии / Под ред. С. Г. Гаранина, В. Д. Селемира, В. П. Соловьева. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017. Т. 2. С. 216–222.

3. Demidov V. A., Boriskin A. S., Stepanov N. V., at all. Electro-Exploded Current Opening Switch Powered from Magneto-Cumulative Generator // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg, Berlin – Humbolt University at Berlin. 2005. P. 94–98.

4. Голосов С. Н., Демидов В. А., Казаков С. А. и др. Испытание устройства на основе дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ480 с взрывным размыкателем тока // В кн.: Проблемы физики высоких плотностей энергии / Под ред. С. Г. Гаранина, В. Д. Селемира, В. П. Соловьева. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017. Т. 2. С. 223–228.

ПОВРЕЖДЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ Элементов, загрязненных частицами углерода

<u>Д. С. Тимаев</u>, Ю. А. Адаменков, С. А. Буйко, Е. А. Кудряшов, В. А. Мазанов, Е. Н. Макейкин, С. В. Маркин, А. С. Мелехин, В. Г. Рогачев, А. В. Сиренко

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

Введение

Поведение частиц пыли в поле мощного лазерного излучения представляет большой научный и практический интерес, так как при нагреве частиц до высокой температуры в сотни и тысячи градусов появляется возможность для интенсивного протекания различных физико-химических процессов.

В данной работе проведено исследование динамики превращения одиночных частиц графита субмиллиметрового размера, предварительно нанесенных на прозрачную кварцевую подложку, в поле непрерывного лазерного излучения. Исследования проводились в бескислородной среде азота или аргона, когда отсутствовало горение углерода в кислороде воздуха. Такой экспериментальный подход показал, что в этих условиях высокотемпературный нагрев частицы углерода, находящейся в контакте с поверхностью кварца, приводит к образованию пленки полупроводникового карбида кремния (SiC) и сопровождается резким изменением оптических свойств поверхности кварцевой подложки. При этом поверхность подложки повреждается практически по всей зоне лазерного пятна с образованием глубокого кратера, центр которого совпадает с центром частицы.

Описание эксперимента

Исследование нагрева частицы углерода, находящейся на прозрачной кварцевой подложке в инертной газовой среде, проводились по схеме, представленной на рис. 1. Лазерное излучение (ЛИ) направлялось на кварцевую подложку диаметром 2,5 см и высотой 1,0 см, в центре которой размещалась исследуемая частица субмиллиметрового размера.



Рис. 1. Схема исследования нагрева углеродных частиц на кварцевой подложке в поле лазерного излучения

Непрерывное излучение длиной волны 1,07 мкм генерировалось промышленным волоконным лазером. Выходной пучок ЛИ, имеющий гауссово распределение интенсивности, проходил через телескопическую систему линз, расширялся до необходимых размеров, отражался от зеркала и падал на образец с частицей. Эффективный радиус лазерного пятна на образце по уровню 0,86 в экспериментах составлял $r_{3\phi\phi} = 5$ мм и $r_{3\phi\phi} = 6$ мм. Максимальная плотность мощности ЛИ в центре пятна менялась от 0,35 кВт/см² до 3,5 кВт/см². Время воздействия ЛИ на образец $t_{\pi\mu}$ составляло 30 с или 120 с в зависимости от постановки эксперимента.

Пространственное распределение интенсивности в пятне ЛИ измерялось при видеосъемке пятна воздействия на рассеивающем экране с помощью видеокамеры. Погрешность измерения распределения интенсивности ЛИ составляла ±13 %.

Исследуемые частицы углерода, по форме близкой к сферической, выбирались из измельченного порошка графита с характерным размером ~ 500 мкм. С каждой кварцевой подложкой проводилось по 5 – 7 экспериментов, помещая каждую последующую частицу на свободное от лазерного воздействия место. Перед установкой частицы поверхность кварцевой подложки очищалась мыльным раствором и этиловым спиртом.

Для проведения экспериментов в инертной газовой среде, исследуемый образец помещался на дно полузамкнутого объема, который создавался кварцевой трубой диаметром 75 мм и высотой 120 мм. При проведении опыта осуществлялась постоянная продувка этого объема азотом или аргоном с контролем отсутствия в объеме кислорода воздуха.

Перед экспериментами для определения фактического размера частицы поверхность образца с частицей фотографировались при помощи микроскопа. После лазерного разрушения частицы таким же способом фотографировалась зона повреждений на кварцевой подложке.

Яркостная температура частицы на подложке определялась с помощью пирометра на рабочей длине волны 0,67 мкм. Диаметр фокусировки измерительного пятна равнялся ~ 1 мм. Спектроскопическая температура частицы определялась с помощью матричного спектрометра в диапазоне длин волн от 0,2 до 1,1 мкм. Особенности применяемой пирометрической и спектрометрической методики измерения температуры твердых тел изложены в [1, 2]. Погрешность измерения температуры составляла ±5 %.

Так как в расчетах и при сопоставлении с результатами экспериментов использовалась термодинамическая (реальная) температура, то определение реальной температуры по экспериментальной яркостной температуре осуществлялось с использованием уравнения яркостной пирометрии [3, 4]:

$$\frac{1}{T_{\mathfrak{n}}} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda, T), \tag{1}$$

где T_{π} – яркостная температура реального тела, К, T – термодинамическая (реальная) температура, К, $\epsilon(\lambda, T)$ – спектральная степень черноты, λ – длина волны излучения.

Согласование данных сильно зависело от степени черноты объекта, температура которого определялась пирометрическим способом: чем меньше степень черноты, тем сильнее истинная температура отличалась от яркостной. Если для графита степень черноты не сильно отличалась от 1 и слабо менялась с ростом температуры, то для полупроводника SiC, который образовывался при лазерном нагреве частицы углерода находящейся на кварцевой подложке, степень черноты заметно меньше 1 и сильно зависела от температуры. Поэтому в разделе 2 сравнивались между собой экспериментально полученные яркостные температуры, а разделе 3 расчетные температуры сравнивались с экспериментальными реальными температурами, полученные по формуле (1) с учетом экспериментально определенной степени черноты по спектроскопическим измерениям.

Идентификация продукта синтеза лазерного нагрева частиц графита на кварцевой подложке проводилась с использованием фотолюминисцентной спектроскопии. Для этого исследуемый образец облучался ЛИ длиной волны 325 нм от непрерывного гелий-кадмиевого лазера с одновременной регистрацией спектров фотолюминисценции с помощью матричного спектрометра в диапазоне длин волн от 350 нм до 650 нм.

Экспериментальные результаты

Зависимости яркостной температуры от времени частиц графита на кварцевой подложке при воздействии ЛИ в среде азота и аргона приведены на рис. 2. Из рис. 2а и 2б видно что при интенсивностях ЛИ, воздействующего на частицу графита, менее 1,5 кВт/см² как в азоте так и аргоне температура частицы монотонно увеличивалась до стационарной, величина которой пропорциональна интенсивности ЛИ. Такой ход температуры характерен при лазерном нагреве химически инертных частиц, когда частица и подложка не претерпевают никаких фазовых изменений.



Рис. 2. Экспериментальные зависимости яркостной температуры от времени частиц графита на кварцевой подложке при воздействии ЛИ: а – в среде азота, б – в среде аргона

При увеличении интенсивности воздействующего ЛИ свыше $1,5 \text{ kBt/cm}^2$ как в азоте, так и в аргоне ход временных зависимостей яркостной температуры частицы изменялся. Вначале температура за 1-2 с. резко повышалась до максимальной, а затем быстро уменьшалась в 2-2,5 раза до стационарной. Визуальные наблюдения после опыта показывали, что частица исчезала, а на кварцевой подложке по всему сечению лазерного пучка возникала зона заметных повреждений в виде кратера и оплавления поверхности, как это видно из рис. 3, 4. При повторном воздействии по этому месту ЛИ такой же интенсивности температура зоны монотонно возрастала до стационарной и не менялась в течение всего времени воздействия.

Очевидно, это вызвано резким изменением оптических и других свойств материала в зоне воздействия вследствие химической реакции между углеродом и кварцем. Это является свидетельством протекания химической реакции с образованием нового вещества. Укажем, что граничная температура (2400–2500°С), при которой меняется динамика лазерного нагрева, совпадает с температурой синтеза промышленного карбида кремния (карборунда) по методу Ачесона [5]. На рис. 3 и 4 представлены фото одной из кварцевых подложек после серии опытов и схема зоны воздействия ЛИ на частицу углерода, расположенную на кварцевой подложке в увеличенном масштабе. Из рис. 3 видно, что при интенсивности ЛИ ~ 0,5 кВт/см² заметные повреждения поверхности кварцевого элемента отсутствуют. При дальнейшем увеличении интенсивности ЛИ до 1,75 кВт/см² и выше эти повреждения принимают характерный вид с концентрическими зонами повреждения.



Рис. 3. Кварцевая подложка после серии опытов с частицами графита



Рис.4. Схема зоны воздействия ЛИ на частицу углерода, расположенную на кварцевой подложке

Из рис. 3 и 4 видно, что при нагревании частицы углерода лазерным излучением интенсивностью свыше 1,75 кВт/см² на поверхности образца в области под частицей образуется кратер, размер которого соизмерим с исходными размерами частицы. Размеры зоны химического травления и оплавления кварца вокруг частицы практически на порядок больше и близки к диаметру воздействующего лазерного пучка.

Таким образом, из сопоставления временной зависимости температур, фактов исчезновения частицы, образования кратера и зоны повреждения, граничной температуры начала реакции и учета химического состава исходных веществ (углерод и оксид кремния) можно прийти к выводу, что при лазерном нагреве частиц углерода, находящихся на кварцевой подложке при температуре свыше 2400–2500 °С протекает химическая реакция образования карбида кремния [6].

$$\operatorname{SiO}_{2} + 3C \stackrel{T=2500 \,^{\circ}\mathrm{C}}{=} 2\mathrm{CO} + \mathrm{SiC}.$$
(2)

Уточнение химической природы соединения, синтезированного после лазерного нагрева частицы графита на кварцевой подложке, было проведено по спектрам фотолюминисценции (ФЛ). На рис. 5 приведены ФЛ-спектры в центре кратера, где первоначально находилась частица графита, самой кварцевой подложки и промышленного карборунда. Из рис. 5 видно, что в диапазоне длин волн от 385 до 550 нм, соответствующих политипам SiC [7], наблюдаются три интенсивных пика на длинах волн $\lambda_1 = 441$ нм, $\lambda_2 = 472$ нм и $\lambda_3 = 504$ нм.

В целом, спектры ФЛ синтезированного продукта и промышленного карборунда, состоящего из смеси политипов SiC, практически идентичны между собой, тогда как спектры ФЛ исходных продуктов значительно отличаются.



Рис. 5. Спектры фотолюминисценции: а – кварца, б – карборунда, в – продукта синтеза графита с кварцем

Таким образом, проведенные измерения температуры и спектров фотолюминисценции однозначно показывают, что при лазерном нагреве частиц углерода (графита), размещенных на кварцевой подложке в инертной газовой среде, образуется карбид кремния. Образование карбида кремния обусловлено реакцией нагретого до высокой температуры углерода (графита) с оксидом кремния [6].

Численное моделирование

По условиям эксперимента, подложка с частицей углерода, через которую проходило непрерывное лазерное излучение, представляла собой диск с плоскопараллельными торцами, изготовленный из кварца с малым коэффициентом поглощения. На рис. 6 представлена геометрия задачи и фрагмент расчетной сетки.





Кварцевая подложка имела радиус R = 1,25 см и толщину L = 1 см. В расчетах использовались теплофизические характеристики кварца, графита и карбида кремния приведенные в [8]. Частица моделировалась диском заданного радиуса. Такая постановка была принята для упрощения построения расчетной модели и соответствующей ей сетки. Частица располагалась в центре кварцевой подложки. Расчетный радиус частицы выбирался из условия равенства площадей частицы из эксперимента и моделируемой частицы в виде круга или эллипса. Так как реальная частица моделировалась диском бесконечно малой толщины, то в расчетах учитывалось только поверхностное поглощение, тогда как в действительности присутствует объемное поглощение из-за конечной толщины реальной частицы. В силу этого приближения результаты расчетов и экспериментов могут отличаться при малых значениях плотности мощности ЛИ. При больших плотностях мощности данный факт играет меньшую роль, так как из-за высоких градиентов температура быстрее выравнивается по объему.

Для получения температурных полей в расчетах моделировались различные варианты расчетных схем, выбранных с учетом особенностей проводимых экспериментов. В силу существенного различия размеров кварцевой подложки и моделируемых частиц выбиралась соответствующая расчетная сетка. В области частицы она была более подробной для повышения точности расчета.

С помощью пакета программ «ЛОГОС» [9] были рассчитаны два варианта лазерного нагрева одиночной инертной частицы, находящейся на прозрачной подложке, без учета фазовых переходов и протекания химической реакции между частицей и подложкой. Для моделирования были выбраны опыты с графитовой частицей, находящейся в аргоне при плотностях мощности ЛИ, равные q = 500, 1000 и 1500 Вт/см². Во всех расчетах коэффициент поверхностного поглощения принимался постоянным и равным $\xi_f = 0.9$. Эквивалентный радиус частицы равнялся $r_{3 \text{кв}} = 240$ мкм. В первом варианте расчетов принимался идеальный тепловой контакт между частицей и кварцевой подложкой с коэффициентом термического сопротивления равным нулю. В соответствие с [10] под коэффициентом термического сопротивления величина обратная коэффициенту теплоотдачи газового зазора между частицей и кварцевой подложкой, т. е.:

$$\alpha = \frac{h}{\lambda}, R = \frac{1}{\alpha},\tag{4}$$

где h – усредненная толщина зазора между частицей и кварцевой подложкой, м, λ – коэффициент тепловодности среды в зазоре, Вт/м·К, R – коэффициент термического сопротивления, К·м²/Вт

В пакете программ «ЛОГОС» термическое сопротивление учитывается скачком температур между контактирующими средами, а зазор в явном виде не моделируется. Данный феноменологический подход позволяет получить хорошее согласие расчета с экспериментом.

Результаты проведенных расчетов и их сравнение с экспериментами для условий без учета протекания химической реакции образования SiC, приведены на рис. 7.



Рис. 7. Зависимости температуры частицы от времени в экспериментах и расчетах при идеальном тепловом контакте частицы: а – с подложкой, б – с учетом термического сопротивления

Из рис. 7а видно, что общий характер экспериментальных и расчетных зависимостей температуры от времени согласуются между собой: температура быстро выходит на стационарный уровень, когда приход лазерной энергии в частицу компенсируется кондуктивным, конвективным и лучистым отводом тепла. Однако значения стационарных экспериментальных и расчетных температур при большом времени лазерного облучения различались в 2 с лишним раза при одной и той же интенсивности ЛИ. Это различие было максимальным при малых интенсивностях ЛИ. Такая разница связана с не идеальностью теплового контакта между частицей и подложкой в выбранной нами расчетной модели. В реальных условиях эксперимента, когда частица графита с произвольной шероховатостью поверхности находилась на поверхности кварцевой подложки, идеальный тепловой контакт между ними, конечно же, отсутствовал. Из рис. 76 видно, что учет термического сопротивления между областями расчетной сетки, моделирующей частицу и подложку, позволил согласовать результаты расчетов и экспериментов по значениям температур в центре частицы. Отметим, что в этом варианте тепловые потоки на границе между частицей и кварцем различались примерно на 10 %.

Таким образом, проведенные с помощью пакета программ «ЛОГОС» численные расчеты лазерного нагрева одиночной инертной частицы на кварцевой подложке с учетом неидеальности теплового контакта между ними и отсутствия фазовых переходов и химических реакций показали неплохое согласие с результатами экспериментов в диапазоне исследованных интенсивностях ЛИ до 1,5 кВт/см².

Для расчетного описания результатов экспериментов по лазерному нагреву частицы углерода на кварцевой подложке при плотностях мощности ЛИ выше 1,5 кВт/см², было принято, что при температуре $T \sim 2300 - 2500$ °C между углеродом и кварцем происходит реакция образования карбида кремния по реакции (2). В результате этой реакции на поверхности кварцевой подложки образуется слой карбида кремния, который будучи политипическим полупроводником с шириной запрещенной зоны в диапазоне от 2,2 до 3,3 эВ [18, 19], имеет коэффициента поглощения, сильно отличающийся от коэффициента поглощения исходной частицы графита. Толщина этого слоя в условиях проводимых экспериментов может достигать нескольких микрометров.

При моделировании, принималось, что на первой стадии поглощение лазерного излучения в области частицы графита происходит с коэффициентом поглощения $\xi_f = 0,9$. При нагреве частицы до температуры 2300–2500 °С протекает химическая реакция образования карбида кремния и коэффициент поглощения в области частицы значительно уменьшается. Кроме того, экспериментальные исследования показали, что во всем сечении лазерного пучка, проходящего через кварцевую подложку, возникает область с коэффициентом поглощения, отличным от поглощения кварцевой подложки. Поэтому при численном моделировании лазерного нагрева графитовой частицы в инертной газовой среде варьировались размеры областей поглощения и коэффициенты поверхностного поглощения. Эквивалентный радиус частицы принимался равным $r_{экв} = 259$ мкм. Коэффициент поверхностного поглощения для исходной частицы графита составлял так же, как и ранее $\xi_f = 0,9$. В данном варианте модели термическое сопротивление не учитывалось, так как предполагалось, что карбид кремния с подложкой имел идеальный тепловой контакт.

В расчетах было рассмотрено 2 варианта размеров областей поглощения лазерного излучения, образующихся в ходе реакции:

– область поглощения SiC соответствует размерам частицы $r = r_{3KB}$, и дополнительная область радиусом r = 1 мм;

– область поглощения SiC радиусом r = 500 мкм, и дополнительная область поглощения радиусом r = 3 мм.

При моделировании второй стадии лазерного нагрева осуществлялась расчетная подгонка коэффициента поглощения SiC, так как он не был известен. Коэффициент поглощения варьировался в диапазоне от 0,1 до 0,45. В результате наилучшее согласие было получено при следующих параметрах:

– вариант 1: область, где образуется SiC, соответствует размерам частицы, т. е. r_{3KB} , и $\xi_f = 0.45$ при q = 2.5 кВт/см², $\xi_f = 0.60$ при q = 1.75 кВт/см², область радиусом r = 1 мм $\xi_f = 0.02$ для всех вариантов расчета;

– вариант 2: область, где образуется SiC, радиусом r = 500 мкм и $\xi_f = 0,15$ при q = 2,5 кВт/см², $\xi_f = 0,21$ при q = 1,75 кВт/см², и дополнительная область поглощения радиусом r = 3 мм и $\xi_f = 0,02$ для всех вариантов расчета.

Характерное время протекание реакции выбиралось по результатам экспериментов в пределах 0,7–2,5 секунд. В частности, для значения плотности мощности ЛИ q = 1,75 кВт/см² время реакции равнялось $t_p \approx 2,7$ с, а для q = 2,5 кВт/см² и больше время реакции составляло $t_p \approx 0,7$ с.

На рис. 8 сравниваются результаты расчетов с экспериментальными данными.

Из сравнения результатов, приведенных на рис. 8 видно, что как характер зависимости, так и значения температур, полученные в ходе расчетов и эксперимента, находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом для 1 варианта расчетной области. При использовании 2 варианта расчетной области расчетные данные отличаются от эксперимента на стадии химической реакции. Это может быть связано с учетом всех особенностей протекания химической реакции.



Рис. 8. Зависимость температуры частицы от времени: а – при q = 1,75 кВт/см², б – при q = 2,5 кВт/см²

Заключение

Проведено расчетно-экспериментальное исследование теплофизических, оптических и химических процессов, происходящих с углеродными частицами, находящимися на поверхности кварцевой подложки в инертной газовой среде и облучаемых непрерывным лазерным излучением интенсивностью в диапазоне от 0,35 до 3,5 кВт/см².

При лазерном облучении плотностью мощности менее 1,5–1,75 кВт/см² частицы углерода на кварце монотонно нагреваются до стационарной температуры как химически инертные объекты. Повреждения поверхности кварцевой подложки при этом не происходит. При плотности мощности в исследованном диапазоне от 1,75 до 3,5 кВт/см² наблюдалось двустадийное изменение температуры углеродной частицы. На начальной стадии процесса температура частицы за время 1–3 с достигала 2200–3000 °С, затем резко уменьшалась до стационарного уровня ~ 1400–1600 °С и держалась такой в течение всего оставшегося времени облучения. Сама частица исчезала, а на подложке образовывалась зона повреждения практически по всей зоне лазерного пятна с образованием кратера, центр которого совпадал с центром частицы.

Обнаруженный эффект резкого уменьшения температуры частицы углерода после ее лазерного нагрева свыше 2200–2400 °C объясняется образованием на кварцевой подложке карбида кремния SiC. Карбид кремния, являясь полупроводником, обладает существенно меньшим коэффициентом поглощения и нагревается в поле лазерного излучения до меньшей температуры. Синтез карбида кремния при лазерном нагреве углерода на кремниевой подложке подтверждается совпадением спектров фотолюминисценции образовавшегося продукта (карбида кремния) и промышленного карборунда.

С использованием программного модуля комплекса «ЛОГОС» – «ЛОГОС-Тепло» проведено численное моделирование процесса взаимодействия лазерного излучения с частицей углерода, находящейся на прозрачной подложке из кварца. Разработанная расчетная модель учитывает изменение теплофизических и оптических параметров среды вследствие химической реакции между углеродом и кварцем посредством изменения размеров областей поглощения, коэффициентов поверхностного поглощения и времени реакции образования карбида кремния. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов.

Полученные результаты могут быть полезны для понимания механизма повреждения запыленных оптических элементов в поле мощного лазерного излучения.

Литература

1. Мазанов В. А., Макейкин Е. Н., Русин С. А. и др., Многоканальная спектрально-пирометрическая методика определения яркостной температуры поверхности тел // V Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011 г. С. 211–218.

2. Мазанов В. А., Макейкин Е. Н., Маркин С. В. и др. Взаимодействие излучения ХКИЛ с углеродными материалами // V Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011 г. С. 218–226.

3. Свет Д. Я. // Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М.: Наука, 1968.

4. Брамсон М. А. // Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964.

5. Klinger N., Strauss E. L., Komarek K. L. Reactions between silica and graphite // J. Amer. Ceram. Soc. 1966. Vol. 49. P. 369–374.

6. Глинка Р. Л. // Общая химия. М.: Химия, 1976.

7. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Майский С. М. и др. // Таблицы спектральных линий. М.: Наука, главная. редакция физико-математической литературы, 1977.

8. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. Физические величины. // Справочник под ред. М., Энергоиздат, 1991 г., 1232 с.

9. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5. Свидетельство № 2017612306 от 20.02.2017.

10. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. // Справочник по теплопередаче. М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. С. 320–340. 11. Kahar S. M., Voon C. H., Lee C. C., et al. Synthesis of SiC nanowhiskers from graphite and silica by microwave heating, Materials Science-Poland. 2016. Vol. 34(4). P. 770–779.

12. Vix-Guterl C., Alix I., Ehrburger P., Synthesis of tubular silicon carbide (SiC) from a carbon-silica material by using a reactive replica technique mechanism of formation of SiC, Acta Materialia. 2004. Vol. 52. P. 1639–1651.

13. Магунов А. Н. // Спектральная пирометрия. М.: 2009.

РАСЧЕТЫ ДОЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

<u>Р. П. Трунцева</u>, С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин, В. С. Гордеев, Е. А. Чернышев, А. Н. Залялов

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

Введение

В Институте ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ создана четырехмодульная электрофизическая установка, предназначенная для формирования импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью на полувысоте ~50 нс [1].

На этапе экспериментальной отработки режимов функционирования установки проверяется работоспособность всех ее узлов и систем, при этом для сохранения ресурса установки включения проводятся не в предельных режимах. В частности, большинство включений установки проводятся при пониженном зарядном напряжении генераторов Аркадьева-Маркса ГИН-1000 [2], также используются неоптимальные по выходу ТИ мишени. Тем не менее, для каждого такого режима нам необходимо иметь оценки параметров излучения для сравнения с экспериментальными данными.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов экспозиционной дозы ТИ, формируемого установкой в режиме автономных модулей для зарядных напряжений конденсаторов ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ. Расчеты проводились в соответствии с методикой, предложенной в [3]. Согласно данной методике, на первом этапе методом «частиц-в-ячейке» рассчитываются характеристики пучка электронов, формируемого в диодной нагрузке модуля. На втором этапе методом Монте-Карло рассчитываются интересующие характеристики поля тормозного излучения, при этом полученные на первом этапе характеристики пучка электронов задаются в качестве входных данных.

1. Режим работы установки

Электрофизическую установку планируется использовать в нескольких режимах. Первым из них является режим, в котором модули установки полностью автономны, и нагрузкой каждого из них является отдельный сильноточный вакуумный диод. Данный режим предназначен для облучения объектов большой площади (>1000 см²). Диоды образованы полым кольцевым катодом диаметром 168,3 мм и плоским анодом-мишенью с зазором между ними 8–10 мм. Такая конфигурация обеспечивает близкий к согласованному режим работы диода с импедансом ~2,9 Ом. Оси диодов расположены под углом 18° к центральной вертикальной оси симметрии. Центры мишеней расположены в углах квадрата со стороной 250 мм (диагональ 354 мм). Конфигурация выходной части установки показана на рис.1. В данном режиме поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучения ее отдельных модулей.



Рис. 1. Конфигурация выходной части установки

Мишенные узлы каждого диода состоят из собственно мишени (на этапе пуско-наладочных работ используется мишень из нержавеющей стали толщиной 1 мм, в рабочем режиме – мишень из тантала толщиной 0,1 мм), защитного экрана из нескольких слоев ткани типа «кевлар» суммарной толщиной 1,1 мм и фильтра электронов из полиэтилена толщиной 3 мм. Вывод излучения в атмосферу осуществляется через алюминиевую крышку вакуумной камеры толщиной 6 мм. Суммарная массовая толщина всех поглотителей электронов составляет 1,95 г/см².

Характеристики источников электронов (пространственное, угловое и энергетическое распределения), соответствующие зарядным напряжениям ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ, предварительно рассчитывались методом «частиц-в-ячейке» в программе BEAM25 [4]. Согласно результатам расчетов, во всех случаях в диоде формируется электронный пучок кольцевой формы с внешним диаметром ~16 см (примерно равным наружному диаметру катода) и шириной около 1,5 см. Энергия пучка в импульсе составляет, соответственно, 47, 61 и 75 кДж. Граничная энергия электронов в пучке изменяется от 1,7 до 2,2 МэВ, средний угол падения электронов на мишень во всех случаях составляет ~50°.
2. Описание расчетов

Для расчета пространственного распределения экспозиционной дозы использовалась программа C-007, разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ [5]. В качестве исходных данных задавались расчетные распределения электронов, геометрия мишенных узлов, вакуумной камеры и воздушного пространства за выходным окном вакуумной камеры. Расчетная геометрия представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная геометрия

Для расчета экспозиционной дозы использовалось соотношение:

$$D = 1,14D_{\text{погл.возд.}} = 1,82 \cdot 10^{-17} \sum_{i} [\mu_{eni} \Delta \Phi_{Ei}], \quad (1)$$

где D – экспозиционная доза в кР, $D_{\text{погл.возд.}}$ – поглощенная доза в воздухе, крад; $\Delta \Phi_{Ei}$ – групповые флюенсы энергии квантов, эВ/см²; μ_{eni} – массовые коэффициенты поглощения энергии, см²/г.

Значения коэффициентов поглощения для воздуха взяты из [6].

На рис. 3 показана схема, используемая для расчета экспозиционной дозы.



Рис. 3. Схема расчета экспозиционной дозы

Начало координат совпадает с точкой пересечения центральной оси симметрии с внешней плоской поверхностью выходного окна установки. Оси X, Y расположены горизонтально, ось Z направлена вертикально вниз вдоль центральной оси симметрии. Центры источников излучения расположены в плоскости Z = -7 см. Оси источников фокусируются в точку с координатой Z = 47,4 см. Для расчета экспо-

зиционной дозы используется набор плоскостей, перпендикулярных оси Z, с координатами Z = 0..20 см с шагом dz = 1 см. В каждой из этих плоскостей наблюдения рассчитывается распределение лозы D(x, y). Для этого плоскость накрывается декартовой сеткой с шагом по осям dx = dy = 1 см. Выходным результатом программы СМК является распределение потока энергии гамма-квантов в плоскости наблюдения F(x,y). Деля F(x,y) на площадь элемента поверхности dx dy, получаем распределение плотности потока энергии (флюенса энергии) гаммаквантов $\Phi(x,y)$. Затем по формуле (1) рассчитывается распределение экспозиционной дозы D(x, y) в плоскости наблюдения. Повторяя данную процедуру для каждой плоскости наблюдения, получаем распределение экспозиционной дозы в пространстве D = D(x, y, z).

3. Результаты расчетов

Поскольку излучение, выходящее из мишени, по мере прохождения через поглотители рассеивается на достаточно большой угол, максимальные значения флюенса и экспозиционной дозы реализуются в ближней к источникам излучения плоскости наблюдения (z = 0 см), и убывают по мере удаления от мишеней.

Расчетное распределение экспозиционной дозы в ближней плоскости, нормированное на максимальное значение дозы, показано на рис. 4а. Утолщенными сплошными линиями обозначены контуры площадей, внутри которых доза превышает, соответственно, 0,5 и 0,7 от максимального значения. На рис. 4б показано распределение дозы вдоль оси ОХ, на рис. 4в – вдоль диагонали х=у. Видно, что уже в данной плоскости пятно облучения занимает сплошную область. Участки с максимальной дозой соответствуют проекциям источников на плоскость наблюдения.

Согласно результатам расчетов форма распределения экспозиционной дозы практически не изменяется при переходе от режима к режиму, изменяются лишь максимальные значения дозы. В таблице приведены максимальные значения экспозиционной дозы $D_{\rm max}$ и площади пятна облучения с неоднородностью 30 и 50% в плоскости Z = 0 см в рассматриваемых режимах функционирования установки.

Увеличение максимальной дозы при переходе от первого режима к последнему составляет ~3,5 раза. Площадь пятна облучения с неоднородностью 50 и 30 % слабо зависит от режима работы установки и составляет около 2000 и 1600 см².

На рис. 5 показано расчетное распределение дозы в диагональной плоскости, проходящей через центры двух источников и ось ОZ, нормированное на максимальное значение экспозиционной дозы. На рис. 5 видно, что максимальная доза уменьшается в 2 раза на расстоянии ~10 см от выходного окна. На расстоянии 20 см максимальная доза уменьшается в ~3,5 раза.



Рис. 4. Распределение дозы в плоскости Z = 0 см: а – двумерное распределение; б – одномерное распределение, вдоль оси OX; в – одномерное распределение, вдоль диагонали X = Y

Максимальные значения экспозиционной дозы и площади пятна облучения в плоскости Z = 0 см

Наименование режима	Максимальная экспозиционная доза, кР	Площадь пятна с неоднородностью по дозе 50%, см ²	Площадь пятна с неоднородностью по дозе 30%, см ²
Fe, 70 кВ	2,8	1970	1590
Fe, 80 кВ	4,3	1975	1590
Fe, 90 кВ	5,9	1990	1580
Та, 90 кВ	9,9	2040	1610



Рис. 5. Нормированное распределение дозы в диагональной плоскости

На рис. 6 показаны зависимости максимальной дозы и площади облучения с неоднородностью по дозе 30 и 50 % от координаты z (расстояние от выходного окна до плоскости наблюдения) для указанных режимов работы установки.

При переходе от конфигурации, с мишенью из Fe и зарядным напряжением 70 кB, к конфигурации, с мишенью из Ta и зарядным напряжением 90 кB, максимальная доза увеличивается: от 2,8 до 10,0 кР при Z = 0 см (отношение 3,5), и от 1,0 до 3,1 кР при Z = 19 см (отношение 3,1).

Площадь облучаемой поверхности слабо зависит от параметров установки, при этом по мере удаления от мишеней площадь облучения с неоднородностью 50 % растет линейно в диапазоне от 2000 до 3300-3500 см², площадь облучения с неоднородностью 30 % остается примерно постоянной на уровне 1600-1800 см².



Рис. 6. Зависимость дозы и площади от расстояния от мишени

Выводы

Выполнены расчеты пространственного распределения экспозиционной дозы ТИ для четырех режимов работы электрофизической установки: со стальной мишенью и зарядным напряжением конденсаторов ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ, и с танталовой мишенью и зарядным напряжением 90 кВ.

Максимальная доза при переходе от первого режима к последнему растет от 2,8 до 10,0 кР, площадь пятна с неоднородностью по дозе 50 % составляет во всех случаях ~2000 см², с неоднородностью 30 % – ~1600 см². По мере удаления от источников максимальная доза падает в ~2 раза на расстоянии 10 см и в ~3,5 раза на расстоянии 20 см.

Представленные здесь результаты будут использоваться для сравнения с экспериментальными данными, получаемыми в процессе отработки режима функционирования электрофизической установки с автономными диодами.

Литература

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. Проект электрофизической установки «Гамма-4» // Сборник докладов XVI Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика», г. Саров, 2014. С. 32–37. 2. Avdeeva A. V., Basmanov V. F., Gordeev V. S. et al. Marx generator GIN-1000 with 1 MV output voltage and 80 kJ energy stored // Proceeding of 15-th International Conference on High-Power Particle Beams. BEAMS'2004. Saint-Petersburg, Russia. July 18–23. 2004. P. 327–329.

3. Гордеев В. С., Донской Е. Н., Залялов А. Н., Лазарев С. А., Михайлов Е. С., Ткачук Д. В. Расчет динамики поля тормозного излучения сильноточных ускорителей электронов // Труды международной конференции «XIV Харитоновские тематические научные чтения». Сборник докладов. г.Саров, 2013. С. 168–175.

4. Gordeev V. S. et.al. BEAM25 – program for numerical simulation of the processes of high-current electron beams shaping, acceleration and transportation // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования. 2001. Вып. 39. С. 30–32.

5. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

6. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕР НА ПОЛИКРИСТАЛЛЕ CR:ZNSE, ИЗЛУЧАЮЩИЙ В СРЕДНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

<u>А. Н. Чабушкин</u>, А. А. Манешкин, Е. В. Салтыков, К. В. Воронцов, В. И. Лазаренко, Н. Г. Захаров

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

Введение

Лазеры, на основе соединения ZnSe, легированных ионами Cr²⁺, способны генерировать лазерное излучение в спектральном диапазоне 2–3 мкм. В данной спектральной области находятся пики поглощения целого ряда молекулярных веществ (H₂O, CO, CO₂, CH₄, NH₃ и др.). В связи с этим лазеры, на основе активных элементов из Cr:ZnSe, могут найти применение в лидарах для удаленного мониторинга атмосферы; в медицине (диагностика, хирургия, стоматология и косметология); в технологических процессах обработки полимеров, стекол и композитов; в космической связи. Кроме этого, лазеры, генерирующие в области 3 мкм, используются для накачки ионов Fe²⁺ в соединениях типа A₂B₆, имеющих пик поглощения в этой области [1–3].

В настоящее время изучены генерационные характеристики ионов Cr²⁺ в целом ряде соединений типа А₂В₆, среди которых наиболее перспективными считаются следующие: ZnS, ZnSe и CdSe [4]. Наибольший интерес для легирования ионами Cr²⁺ представляет матрица ZnSe, вследствие оптимального сочетания механических и термооптических характеристик. Низкая теплопроводность соединения Cr:ZnSe ограничивает получение большой мощности генерации на данном материале. Однако, в работе [5] была получена рекордная к настоящему времени мощность генерации в непрерывном режиме за счет быстрого вращения активного элемента из Cr:ZnSe. Мощность Cr:ZnSe-лазера составила P = 140 Вт на длине волны $\lambda = 2500$ нм. Данный метод борьбы с термолинзой был использован нами в эксперименте для случая импульсно-периодического режима работы лазера Cr:ZnSe. В связи с этим, целью настоящей работы являлась отработка методики получения лазерной генерации на вращающемся активном элементе из Cr:ZnSe.

Экспериментальная установка

Ионы Cr^{2+} в соединении ZnSe характеризуются электронно-колебательными спектрами поглощения и люминесценции [6]. Максимум линии поглощения ионов Cr^{2+} в данной матрице составляет $\lambda_{abs} = 1,77$ µm при ширине контура поглощения $\Delta\lambda_{abs} = 0,35$ µm. Данный факт обуславливает большой выбор источников накачки активных элементов из Cr:ZnSe, в качестве которых могут выступать полупроводниковые лазеры, эрбиевые, туллиевые кристаллические и волоконные лазеры. Накачка туллиевыми лазерами уменьшает тепловую нагрузку на активный элемент вследствие малого квантового дефекта. В экспериментах мы использовали накачку импульсно-периодическим лазером на кристаллах Tm:YLF.

Поликристаллические образцы Cr:ZnSe были получены CVD-методом с после ростовым легированием в процессе диффузии при высокотемпературном изостатическом прессовании. Легирование ионами Cr²⁺ производилось с двух сторон диска из поликристалла ZnSe. Поверхности диска Cr:ZnSe полировались, а затем просветлялись на длины волн накачки и генерации (1,9–2,7 мкм) (рис. 1). Диаметр диска равнялся D = 80 мм, толщина h = 7 мм.



Рис. 1. Внешний вид активного элемента Cr:ZnSe

Для накачки активного элемента Cr:ZnSe использовался импульсно-периодический лазер на кристаллах Tm:YLF. Оптическая схема данного лазера представлена на рис. 2.



Рис. 2. Оптическая схема лазера Tm:YLF

Как видно из рис. 2, накачка активного элемента из кристалла Tm: YLF осуществлялась с двух сторон линейками лазерных диодов с длинами волн излучения 793 нм. Излучение фокусировалось в активный элемент двухлинзовыми объективами в пятно диаметром d = 1 мм. Резонатор лазера имел Г-образную схему. При использовании такого типа резонатора получалась генерация σ -поляризованного излучения на длине волны $\lambda = 1,91$ µm. Выходное сферическое зеркало с радиусом кривизны рабочей поверхности r = 300 мм имело пропускание T = 10 % на длине волны генерации. Для реализации импульснопериодического режима работы между дихроичным зеркалом и выходным сферическим зеркалом размещался акустооптический модулятор (AOM). Длительность импульса лазерного излучения при максимальной выходной мощности генерации лазера Tm:YLF составила $\tau = 300$ нс при частоте v = 10 кГц.

Излучение лазера Tm:YLF фокусировалось в активный элемент из поликристалла Cr:ZnSe с помощью линзы с фокусным расстоянием f = 200 мм. Диаметр пятна излучения накачки на активном элементе Cr:ZnSe составил d = 1,2 мм. Оптическая схема лазера Cr:ZnSe представлена на рис. 3. Как видно из рис. 3, резонатор лазера Cr:ZnSe был образован 3 зеркалами. Входное дихроичное зеркало размещалось под углом 45° к оптической оси и имело пропускание $T \approx 85\%$ на длине волны накачки и отражение $R \ge 97\%$ в спектральном диапазоне 2,2–2,8 мкм. Заднее плоское зеркало имело высокий коэффициент отражения на длине волны накачки и генерации, в результате чего обеспечивался двойной проход излучения накачки через активный элемент. Длина резонатора составила L = 45 мм. Активный элемент вращался с частотой v = 2400 об/мин.



Рис. 3. Оптическая схема лазера Cr:ZnSe

Выходное сферическое зеркало имело радиус кривизны r = 100 мм и пропускание в спектральном диапазоне 2,4–2,7 µm около $T \approx 20\%$. В результате проведения генерационных экспериментов длина волны излучения лазера Cr:ZnSe составила $\lambda = 2,65$ µm. Спектр лазерной генерации регистрировался с помощью монохроматора Acton SP 2500 производства фирмы Princeton Instruments. Спектр лазерного излучения представлен на рис. 4.

Также нами проводился анализ поперечного распределения интенсивности лазерного излучения с помощью ИК камеры Ругосат III-С-А. Изображение интенсивности поперечного сечения лазерного пучка представлено на рис. 5.



Рис. 4. Спектр лазерного излучения.



Рис. 5. Поперечное распределение интенсивности излучения лазера Cr:ZnSe

В ходе проведения экспериментов нами регистрировались импульсы генерации Cr:ZnSe-лазера при различной мощности накачки. Осциллограммы данных импульсов представлены на рис. 6а–6в.



Рис. 6. Осциллограммы импульса излучения Cr:ZnSe–лазера (серая кривая) и импульса лазера накачки Tm:YLF-лазера (черная кривая) при различной мощности накачки

На рис. ба мощность накачки близка к пороговой, в результате чего наблюдается единственный узкий пик излучения Cr:ZnSe-лазера, связанный с TEM_{00} модой. При увеличении мощности накачки (рис. бб) для импульса генерации наблюдается характерная пичковая структура, обусловленная многомодовым режимом работы Cr:ZnSe-лазера и релаксационными колебаниями. При дальнейшем увеличении мощности накачки (рис. бв) пички сливаются, кроме первых двух, обусловленных генерацией и релаксационными колебаниями излучения на основной моде. Также стоит отметить уменьшение времени задержки импульса генерации относительно импульса накачки при увеличении мощности накачки.

График зависимости средней мощности генерации в относительных единицах от падающей на активный элемент Cr:ZnSe мощности накачки представлен на рис. 7. Мощность лазерного излучения измерялась с помощью измерителя мощности Nova II производства фирмы Ophir.



Рис. 7. Зависимость мощности генерации лазера Cr:ZnSe от мощности накачки

Дифференциальный коэффициент преобразования излучения накачки в излучение генерации составил $\eta = 33$ %, оптический кпд при этом оказался равен $\eta_0 = 29$ %.

Заключение

В работе реализован импульсно-периодический режим работы Cr:ZnSe-лазера при накачке лазером

на кристаллах Tm:YLF. Зарегистрирован спектр излучения генерации Cr²⁺:ZnSe-лазера. Исследована форма импульсов генерации Cr:ZnSe-лазера в зависимости от мощности накачки.

Получена зависимость мощности генерации Cr:ZnSe-лазера от падающей на активный элемент мощности накачки. Максимальный дифференциальный кпд в экспериментах составил $\eta = 33$ %, при оптическом кпд $\eta_o = 29$ %. За счет вращения активного элемента удалось значительно повысить мощность лазера на основе поликристалла Cr:ZnSe.

Таким образом, можно утверждать, что данный метод борьбы с термолинзой позволяет создавать высокоэффективные источники лазерного излучения в спектральном диапазоне 2–3 µm на соединениях Cr:ZnSe с необходимой для практических применений выходной мощностью.

Литература

1. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D. eth. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II–VI Chalcogenides // Jornal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2015. Vol. 21, № 1.

2. Mirov S., Moskalev I., Vasilyev S. eth. Frontiers of mid-IR lasers based on transition metal doped chalcogenides // Jornal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018.

3. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I. eth. Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} doped mid-IR laser materials // Laser & Photon. Rev. 2010. Vol. 4, No 1. P. 21–41.

4. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I. eth. Frontiers of mid-infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors // Journal of Luminescence. 2013. Vol. 133. P. 268–275.

5. Moskalev I., Mirov S., Gapontsev V. eth. 140 W Cr:ZnSe laser system // Optics Express. 2016. Vol. 24, № 18. P. 21090–21104.

6. Cankaya H., Demirbas U., Erdamar A. K., Sennaroglu A. Absorption saturation analysis of $Cr^{2+}:ZnSe$ and $Fe^{2+}:ZnSe$ // Journal Optical Society of America B. 2008. Vol. 25, No. 5. P. 794–800.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА МКВ-4

А. А. Шаталин, А. Е. Калинычев, Г. В. Карпов, С. С. Ломтев

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

Введение

При моделировании высотных взрывов на стенде МКВ-4 установки «ИСКРА-5» внутри вакуумной камеры создается магнитное образование ловушечной конфигурации, называемое магнитной каверной, и исследуются протекающие в каверне магнитоплазменные процессы. Для создания каверны используется лазерный взрыв расположенной внутри камеры сферической мишени во внешнем квазистатическом соленоидальном магнитном поле, создаваемом расположенными снаружи камеры четырьмя катушками Гельмгольца. Разлетающаяся мишенная плазма раздвигает магнитное поле, в результате чего магнитные силовые линии приобретают конфигурацию. характерную для магнитной ловушки. Обычно в экспериментах используются два лазерных импульса с энергетикой до 300 Дж каждый. С помощью первого лазерного импульса создается магнитная каверна. Второй лазерный импульс, взаимодействующий с плоской металлической мишенью, используется для генерирования быстрых электронов и заполнения ими области магнитной каверны. В зависимости от целей и задач эксперимента параметры и конфигурация внешнего соленоидального магнитного поля могут быть разными. Требуемая напряженность квазистатического магнитного поля может изменяться от сотен эрстед до нескольких килоэрстед. Требуемая исходная конфигурация магнитного поля может варьироваться от распределения с максимумом в центре камеры до распределения с минимумом в средней плоскости, характерного для пробочной конфигурации. Для правильной трактовки результатов экспериментов с лазерной плазмой необходимо возможно более точное знание параметров исходного распределения магнитного поля, которые могут быть получены с помощью достаточно миниатюрных откалиброванных магнитных датчиков. Решение вопроса калибровки магнитных датчиков неоднозначно, поскольку создание специального калибровочного стенда потребует немалых затрат, сравнимых со стоимостью самого стенда МКВ-4. Поэтому было решено провести сравнительно небольшую доработку стенда для проведения на нем калибровочных измерений. Существо доработки состоит во включении последовательно с катушками Гельмгольца одного или нескольких специальных соленоидов, внутри которых могут располагаться калибруемые датчики. Индуктивности соленоидов должны быть достаточно малыми, чтобы не оказывать существенного влияния на токи в катушках Гельмгольца. Погонное количество витков в соленоидах должно быть таким, чтобы напряженность магнитного поля внутри соленоидов примерно совпадала бы с напряженностью поля внутри рабочего объема камеры. Токи в цепях соленоидов и катушек Гельмгольца могут измеряться с помощью стандартных серийно выпускаемых токовых шунтов. При таком подходе существо работы сводится к измерению электрических параметров стенда МКВ-4, правильному выбору калибровочных соленоидов и постановки достаточно корректных измерений протекающих по ним токов.

Описание стенда МКВ-4

Стенд МКВ-4 представляет собой достаточно капитальное сооружение, располагаемое в оптическом зале каналов № 7 и 8 установки «ИСКРА-5» [1]. Фотографии стенда представлены на рис. 1 и 2. Основным элементом стенда является вакуумная камера с окнами для ввода лазерного излучения и диагностики. Снаружи вакуумной камеры располагаются четыре катушки Гельмгольца, соединенные с батареей магнитного поля.



Рис. 1. Камера стенда МКВ-4



Рис. 2. Батарея магнитного поля

Поперечное сечение вакуумной камеры МКВ-4 с катушками Гельмгольца схематично показано на рис. 3.



Рис. 3. Поперечное сечение камеры с катушками Гельмгольца:

Здесь $X_{внутр}$ и $X_{внешн}$ – расстояния между центрами внутренних и внешних катушек Гельмгольца, $R_{\text{кат}}$ – средний радиус катушки. Данные величины соответственно равны:

 $X_{\text{BHVTD}} = 0,538 \text{ M}$ $X_{\text{BHEIIH}} = 1,888 \text{ M}$ $R_{\text{kat}} = 0,6435 \text{ M}$

Вакуумная камера стенда МКВ-4 выполнена из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т. Внешний диаметр камеры – 1110 мм, толщина стенки камеры – 5 мм. Располагаемые снаружи камеры катушки Гельмгольца выполнены в виде трехзаходных спиралей из изолированных медных проводов с суммарным сечением 3×7 мм². Спирали намотаны непосредственно на корпус камеры и уложены в металлические кожухи. Средний радиус намотки -643,5 мм. Две внутренние и две внешние катушки Гельмгольца, попарно объединены между собой; каждая пара соединена со своей секцией конденсаторной батареи. Возможны последовательное и параллельное пар катушек. Конденсаторная батарея выполнена с использованием конденсаторов К41И-7 $(5 \text{ кB}, 100 \text{ мк}\Phi)$, соединенных в виде двух секций по 52 конденсатора в каждой. Емкости секций С₁ и С₂ составляют

$$C_1 = C_2 = 5, 6 \cdot 10^{-3} \Phi.$$

Зарядные устройства позволяют заряжать секции конденсаторной батареи от 2 до 5 кВ за время не более 2 минут. Максимальный энергозапас одной секции – 70 кДж.

Расчет индуктивностей катушек Гельмгольца

Индуктивность отдельной катушки может быть рассчитана по известной формуле [2],

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} N_i^2 d\psi F,$$
 (2)

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума (($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, N_i — количество витков в *i*-ой катушке, d — средний диаметр катушки, ψ и F — табличные коэффициенты, зависящие от геометрии катушек. Катушки были изготовлены сравнительно давно и к моменту выполнения настоящей работы не сохранились данные о числе витков N_i в каждой катушке. Наиболее простым способом определения N_i без разборки катушки представляется нахождение числа витков по ее активному сопротивлению R. Количество витков в отдельной катушке.

$$N_i = \frac{RS_{\rm of}}{\sigma^{-1}\pi D_{\rm kar}},\tag{2}$$

где $S_{\rm ofim}$ – суммарная площадь поперечного сечения трехзаходной намотки, σ^{-1} – удельное сопротивление проводника (для меди $\sigma^{-1} = 0,0175$ Ом·мм²/м). $D_{\rm кат}$ – средний диаметр катушки. Зная геометрию катушек и активные сопротивления *R*, нетрудно определить числа витков N_i в каждой катушке. Найденные значения N_i приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество витков в катушках камеры стенда МКВ-4

Номер катушки	1	2	3	4
Активное сопротивле- ние <i>R</i> , Ом	0,614	0,643	0,652	0,671
Количество витков, N _i	182	191	194	199

Входящие в (1) коэффициенты ψ и *F* определяются из таблицы (6-3) [2] в зависимости от геометрических параметров ϕ и ρ определяемых размерами катушек,

В соответствии с обозначениями рис. 6, a – ширина, r – толщина, а d – средний диаметр катушки Гельмгольца.



Рис. 4. Геометрия магнитной катушки

Размеры катушки для нашего случая,

d = 1,287 M a = 0,085 M r = 0,17 M.

По таблице (6–3) [2] находим соответствующие им значения Ψ и F,

$$\rho = \frac{r}{d} = \frac{0.177}{1,287} = 0,1375 \rightarrow \Psi = 36,14,$$
$$\frac{1}{\varphi} = \frac{a}{r} = \frac{0,085}{0,177} = 0,48 \rightarrow F = 0,86.$$

Из (1) можно найти индуктивности каждой катушки. Полученные значения индуктивностей приведены в табл. 2.

Таблица	2

Рассчитанные	индуктивности	катушек

Номер катушки	1	2	3	4
L , м Γ н	66,42	72,84	74,89	79,32

Для уточнения значений индуктивности использовался экспериментальный метод по кривым напряжения U(t) на выходных клеммах конденсаторной батареи, измеряемым с помощью высокоомного делителя. Место включения высокоомного делителя напряжения схематично показано на рис. 5.



Рис. 5. Измененная электрическая схема запитки катушек Гельмгольца

Относительное различие экспериментальных и расчетных данных по индуктивностям не превышает ± 4 %. Приведенная на рис. 5 электрическая схема, по существу, иллюстрирует включение катушек Гельмгольца на стенде МКВ-4. Изменения этой схемы, необходимые для проведения калибровки, состоят во включении дополнительного соленоида L_к и измерительного токового шунта R_ш. В остальном все элементы схемы соответствуют изначально используемым на стенде МКВ-4. Здесь С – емкость секции конденсаторной батареи, через L2, R2 и L3, R3 обозначены индуктивности и активные сопротивления отдельных катушек. Д $_{22}$ и Д $_{23}$ – низкочастотные диоды типа Д233-500-44. Последовательно соединенная пара диодов Д₂₂ – Д₂₃ выполняет роль кроубарзамыкателя, предотвращающего перезарядку секции конденсаторной батареи. Благодаря этим диодам, обеспечивается однополярный импульс тока в магнитных катушках. Секция конденсаторной батареи выполнена с использованием 52 конденсаторов К41И-7 (5кВ, 100 мкФ).

Описание калибровочного соленоида. Результаты калибровки

Согласно результатам расчета и измерений, индуктивности катушек Гельмгольца составляют ~70 мГн. Включение в цепь разряда батареи калибровочного соленоида индуктивностью L_к на один-два порядка меньшей величины не сильно повлияет на параметры токового импульса в магнитных катушках. Исходя из этого, были выбраны параметры калибровочного соленоида, представляющего собой однозаходную катушку из медного изолированного провода диаметром 4 мм намотанного на полиэтиленовую трубу диаметром 110. Длина соленоида 1135 мм, количество витков – 266. Активное сопротивление соленоида 0,25 Ом, индуктивность 0,745 мГн. Для токовых измерений использовался промышленно выпускаемый манганиновый шунт 75ШИП-200А, рассчитанный на максимальный 200 А и имеющий номинальное сопротивление $R_{\rm m} = 375$ мкОм. Калибруемые датчики располагались в средней плоскости внутри соленоида. Процедура калибровки опробовалась на магнитных датчиках двух типов.

• Изготавливаемый в лабораторных условиях индукционный датчик, представляющий собой катушку из 15 витков провода МГТФ с диаметром изоляции 0,3 мм намотанного на диэлектрический корпус с внешним диаметром 16 мм. Чувствительность датчика находится расчетным способом. Измеряемая кривая зависимости *H*(*t*) определяется путем интегрирования осциллографического сигнала.

• Промышленно выпускаемый датчик Холла, чувствительность которого указывается в паспорте. Датчик заключен в прямоугольный пластиковый корпус со сторонами 5×5×2 мм³ и тремя электрическими контактами. Наибольшая плоская поверхность корпуса ориентирована перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

Напряженность магнитного поля в центре соленоида может быть рассчитана по классической формуле

$$H = \frac{N}{l}I(t),\tag{3}$$

где N — количество витков в калибровочном соленоиде, l — его длина, I(t) — ток в соленоиде, измеряемый с помощью шунта. Таким образом, зависимость от времени напряженности магнитного поля в центре соленоида может быть найдена тремя независимыми способами. На рис. 6 приведены соответствующие кривые H(t).



Рис. 6. Кривые напряженности, полученные тремя независимыми способами: 1 – напряженность, рассчитанная по току в соленоиде; 2 – напряженность, полученная интегрированием сигнала индукционного датчика; 3 – напряженность, измеренная датчиком Холла

Заключение

Реализована возможность использования стенда МКВ-4 для прецизионной калибровки датчиков магнитного поля. Для этого вы полнена доработка электрической схемы стенда, состоящая в использовании дополнительного соленоида, включенного в цепь разряда батареи магнитного поля. Калибруемые датчики располагаются внутри дополнительного соленоида; ток в цепи соленоида измеряется с использованием прецизионного манганинового шунта. Индуктивность соленоида на два порядка меньше индуктивностей катушек магнитного поля, благодаря чему влияние его на разряд батареи магнитного поля пренебрежимо мало. Используя стенд МКВ-4, проведена калибровка индукционных датчиков и магнитных датчиков типа датчиков Холла.

Литература

1. Анненков В. И., Безуглов В. Г., Бессараб А. В. и др. Новые возможности «Искра-5» // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 6. С. 508–510.

2. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатом издат, 1986.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ РЕАКТОРА ВИР-2М ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КВАЗИИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

<u>Д. А. Юнин</u>, С. П. Котков, А. А. Кубасов, П. В. Таракаенко, А. Д. Авдеев

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

Работа посвящена разработке макета системы управления реактивностью реактора ВИР-2М для реализации импульса делений на запаздывающих нейтронах (квазиимпульса) с характерной длительностью импульса ~ 0,1–10 с и реализацией полного запаса реактивности.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ эксплуатируется импульсный апериодический реактор на растворном топливе ВИР-2М [1]. Исследовательская ядерная установка (ИЯУ) ВИР-2М предназначена для получения одиночных импульсов делений на мгновенных нейтронах (длительность импульса не более 10 мс) и для работы на постоянной (статической) мощности. Однако для некоторых экспериментов требуются импульсы делений с длительностью 0,1–10 с, которые возможно сгенерировать в импульсе делений на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсе).

Ранее на ИЯУ ВИР-2М проводились исследования по генерации квазиимпульсов [2]. Были решены следующие задачи:

а) отработана возможность ввода положительной реактивности со скоростями ~0,2–4,0 $\beta_{3\phi}$ /с ($\beta_{3\phi}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов, $\beta_{3\phi} = 0,008$), что соответствует скоростям извлечения импульсных поглощающих стержней 0,01–1 м/с;

б) обеспечена регистрация формы импульсов в диапазоне контролируемых параметров;

в) разработан алгоритм перевода реактора из подкритического состояния в надкритическое на запаздывающих нейтронах.

Штатная система управления реактивностью позволяет создать либо одиночный импульс на запаздывающих нейтронах (рис. 1), либо серию импульсов на запаздывающих нейтронах (рис. 2).

Сгенерированные импульсы не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к экспериментам по длительности импульса и энерговыделению, и в данной работе для реализации квазиимпульсов различной формы, длительности, энерговыделения были проведены следующие этапы:

• создана упрощенная модель кинетики ВИР-2М;

 рассчитано положение ИС для реализации квазиимпульсов;

• создан макет пневмопривода ИС с новым быстродействующим пневмоклапаном и новым регистратором положения стержня;



Рис. 1. Форма импульса на запаздывающих нейтронах с энерговыделением ~7 МДж при извлечении одной группы импульсных стержней (ИС)



Рис. 2. Серия импульсов на запаздывающих нейтронах с энерговыделением ~ 20,1 МДж при извлечении двух групп ИС

 экспериментально исследованы зависимости движения ИС от параметров управления макета пневмопривода (от начального давления в ресивере, диаметра дроссельной шайбы, сигнала управления клапаном);

 создана расчетная модель макета пневмопривода на основе передаточной функции, связывающая положение ИС с параметрами управления макетом. Передаточная функция получена из анализа экспериментальных данных;

• по расчетной модели макета были определены и экспериментально отработаны на макете пневмопривода алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсного режима работы на ВИР-2М.

Модель кинетики ВИР-2М с учетом инерции топливного раствора

Для достижения цели работы была создана модифицированная одноточечная модель кинетики реактора (1-3), а именно, добавлен член т_{запаздывания}, учитывающий инерцию обратной связи по мощности при расширении топливного раствора.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\Im \Phi \Phi}}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i(t) + Q(t), \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{2\phi\phi i}}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, 2...6.$$
(2)

где: P(t) — мощность системы; $\rho(t)$ — реактивность системы; $\beta_{9\phi\phi}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; Λ — время генерации мгновенных нейтронов; λ_i — постоянная распада предшественников запаздывающих нейтронов *i*-ой группы; $C_i(t)$ — концентрация ядер предшественников запаздывающих нейтронов *i*-ой группы; $\beta_{9\phi\phi i}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов *i*-ой группы; Q(t) — мощность внешнего источника.

$$\rho(t) = \rho(t)_{\text{введенное}} - A_0 \int_0^t P(\tau - \tau_{\text{запаздывания}}) d\tau, \quad (3)$$

где: $\rho(t)_{\rm введенное}$ — реактивность, которую необходимо сообщить системе с помощью ИС; A_0 — коэффициент гашения реактивности $\left[\beta_{\rm эф\phi}/M\mbox{Д}\varkappa\right]$; $\tau_{\rm запаздывания}$ — время запаздывания обратной связи по мощности.

Положим, что запаздывание обратной связи по мощности происходит из-за того, что расширение топливного раствора не происходит, пока волна расширения от «центра делений» в активной зоне не достигнет свободной верхней границы топливного раствора (рис. 3).

Тогда время запаздывания т_{запаздывания} оценим по формуле 3:

$$\tau_{3апаздывания} = \frac{H}{c},$$
 (3)

где: *H* – расстояние от центра делений до верхней границы топливного раствора; *c* – скорость звука в топливном растворе.

На рис. 4 представлено сравнение результатов расчета по формулам (1-4) с экспериментальными данными и с моделью Фукса–Хансена [3] для импульса с энерговыделением 10 МДж.



Рис. 3. Разрез активной зоны ИЯУ ВИР-2М: 1 – верхняя граница топливного раствора, 2 – «центр делений»



Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для импульса с энерговыделением ~ 10 МДж

Созданная модель показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными, однако заметны расхождения в «хвосте» импульса, что объясняется отсутствием в модели учета радиолитического кипения топливного раствора.

На рис. 5 представлено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для импульса на запаздывающих нейтронах.



Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для импульса на запаздывающих нейтронах с энерговыделением ~ 7 МДж

В квазиимпульсе наблюдается различие в расчетных и экспериментальных данных в хвосте импульса так же из-за отсутствия учета в модели других механизмов гашения реактивности.

Однако учитывая характерное время ~ 5 с, с которого начинаются существенные различия в расчетных и экспериментальных данных в квазиимпульсе, в расчетах будем пользоваться данной моделью кинетики с учетом инерции топливного раствора.

Были предложены варианты квазиимпульсов различной длительности и формы и с помощью модели, описанной выше, была вычислена реактивность, которую необходимо сообщить системе (введенная реактивность) с помощью извлечения ИС (рис. 6–8).







Рис. 7. Пример расчета реактивности для квазиимпульса треугольной формы с возрастающей мощностью



Рис. 8. Пример расчета реактивности для квазиимпульса треугольной формы с убывающей мощностью

Расчет положения органов управления реактивностью

Для предложенных квазиимпульсов реактивность, вносимая ИС, пересчитывалась в высоту извлечения ИС по экспериментальной зависимости (5), определенной на стадии физического пуска ВИР-2М:

$$\frac{\rho_{\text{стержня}}(t)}{\rho_{\text{max}}} = 1,024 \cdot \left(1 - e^{-0,0064 h(t)}\right)^{1,2}, \qquad (5)$$

где: $\rho_{\text{стержня}}(t) - \phi$ изический вес стержня ИС (в единицах $\beta_{9\phi\phi}$); h(t)- высота извлечения стержня ИС (в мм); $\rho_{\text{max}} = 4.6 \cdot \beta_{9\phi\phi}$.

На рис. 9 представлен пример, как должно изменяться положения ИС для обеспечения квазиимпульса колоколообразной формы. Характерные скорости движения стержня порядка ~ 0,1–2 м/с.



Рис. 9. Расчетная высота импульсного стержня для генерации квазиимпульса колоколообразной формы

Макет пневмопривода ВИР-2М

Генерация импульса делений на ИЯУ ВИР-2М происходит при извлечении из активной зоны ИС, которые связаны с поршнем пневмопривода системы. На рис. 10 представлен внешний вид пневмоприводов.



Рис. 10. Внешний вид пневмоприводов ИЯУ ВИР-2М

Пневмопривод состоит из ресивера, в котором создается начальное давление воздуха, управляющего клапана, регулирующего подачу воздуха из ресивера в подпоршневое пространство пневмоцилиндра, и стержней управления реактивностью, которые соединены с поршнем пневмопривода. Управляющий клапан обладает быстродействием ~ 0,5 с.

Анализ расчетного положения стержней привел к выводу, что существующий пневмопривод не подходит для реализации нового режима работы, т.к. не обеспечивает управляемость положением стержней на требуемых временах и скоростях

Предложена модернизация пневмопривода и создан макет пневмопривода на основе демонтированного пневмопривода, аналогичного установленному на ИЯУ ВИР-2М.

Однако, в отличие от штатного пневмопривода макет подвергся конструкционным доработкам. Макет состоит из:

• пневмопривода системы управления реактивностью, аналогичного установленным на ИЯУ ВИР-2М;

• основного ресивера объемом 5 л, питающего пневмопривод;

• управляющего клапана КБ-20-70 с пневматическим управлением и быстродействием ~20 мс;

 дроссельной шайбы, которая устанавливалась сразу за управляющим клапаном. Она представляет собой шайбу с отверстием определенного диаметра. Дроссельная шайба необходима для ограничения скорости подачи воздуха в подпоршневое пространство привода;

• регистратора положения ИС, представляющего собой оптический сенсор и обеспечивающий погрешность измерения положения не более 1 мм;

• вспомогательной пневмосистемы, обеспечивающей управление клапаном и состоящей из вспомогательного ресивера и электропневмоклапана MHE2-MS1H-5/2-QS-4-К с быстродействием ~5 мс;

• Модульной платформы NI-PXI, для которой в среде разработки LabVIEW написано программное обеспечение для задания сигнала управления клапаном и регистрации данных о положении ИС с оптического сенсора.

Экспериментальные данные, полученные на макете пневмопривода

На данном макете было получено большое количество экспериментальных данных о движении стержня в зависимости от начального давления в ресивере, диаметра дроссельной шайбы и сигнала управления клапаном. Эти данные необходимы для создания модели системы и выбора оптимального режима работы. Пример полученных данных показан на рис. 11. В данном случае сигнал управления *Q* последовательно открывал и закрывал клапан (в скобках указано время в милисекундах открытого состояния клапана / закрытого состояния клапана).

Также была оценена повторяемость движения ИС по трем пускам при фиксированных параметрах управления макетом. При этом среднеквадратичное отклонение по всей высоте движения ИС не превысило 0,6 мм.



Рис. 11. Зависимость высоты ИС от параметров управления макетом (установлена дроссельная шайба с отверстием диаметром $\emptyset = 2,7$ мм): 1–7 – различные параметры управления макетом; P – начальное давление в ресивере (атм);

Q – скважность сигнала управления клапаном (мс/мс)

Расчетная модель пневмопривода

Была создана модель пневмопривода на основе передаточной функции (6), рассчитанной по полученным экспериментальным зависимостям высоты ИС от параметров управления макетом пневмопривода:

$$Y(s) = \frac{343, 8+3280, 9s}{1+0,00923s+67, 8s^2} U(s),$$
 (6)

где: Y(s) — преобразование Лапласа для выходного сигнала системы (положения ИС); U(s) — преобразование Лапласа для входного сигнала системы (сигнал управления клапаном, диаметр дроссельной шайбы, начальное давление в ресивере пневмопривода); *s* — комплексная переменная *s* = σ + *i* ω .

Расчет положения ИС по модели пневмопривода сравнивался с экспериментальными данными. Пример сравнения расчета и эксперимента представлен на осциллограмме (рис. 12). Сплошные линии – экспериментальные данные, пунктирные – расчет по модели. Модель позволяет качественно предсказывать положение ИС при заданном давлении в ресивере, диаметре дроссельной шайбы и сигнала управления электропневмо импульсных стержней клапана.





Расчет сигнала управления электропневмоклапаном

Модель пневмопривода использовалась для расчета сигнала управления клапаном. В модель задавалось расчетное желаемое положение стержня, расчет давал необходимый сигнал управления клапаном. Затем расчетный сигнал подавался на макет пневмопривода, и получалось экспериментальное положение стержня на макете. На рис. 13 приведен пример расчета и эксперимента для квазиимпульса возрастающей мощности.



Рис. 13. Сравнение расчета и экспериментальных данных высоты ИС для квазиимпульса возрастающей формы: 1 – расчетное положение ИС для квазиимпульса, 2 – отработанное положение ИС на макете, 3 – сигнал управления клапаном

Таким образом на макете были отработаны алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсов различной формы, длительности, энерговыделения.

Заключение

В ходе работы:

 адаптирована для расчетов упрощенная модель кинетики ИЯУ ВИР-2М.

2) рассчитано положение стержней управления реактивностью для реализации квазиимпульсов.

 создан макет пневмопривода с новым быстродействующим пневмоклапаном и новым регистратором положения стержня.

 экспериментально исследованы зависимости движения стержня от параметров управления макетом.

5) создана математическая модель макета пневмопривода на основе передаточной функции.

6) по модели макета были рассчитаны и экспериментально отработаны алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсного режима работы на ИЯУ ВИР-2М.

Литература

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеенко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

2. Глухов Л. Ю., Котков С. П. Кубасов А. А., и др. Расширение облучательных возможностей ИЯР ВИР-2М при работе в импульсном режиме // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. 2. С. 35–40.

3. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.

секция З

Инженерные науки

Председатели секции:

д-р физ.-мат. наук В. С. Нефедов канд. техн. наук В. Б. Профе

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

<u>Р. В. Боев</u>, А. В. Елесин

Научно-исследовательский институт механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Введение

Широкое использование композитных материалов при создании элементов конструкций в различных областях современной техники делает актуальным исследование процессов деформирования и потери устойчивости предварительно напряженных композитных цилиндрических оболочек. Имеющиеся в этом направлении исследования посвящены, как правило, анализу нелинейного поведения и потери устойчивости цилиндрических оболочек из традиционных изотропных материалов [1-7]. Численное исследование процесса потери устойчивости композитных цилиндрических оболочек при динамических нагрузках рассматривались в работах [8-14]. В то же время нелинейные пространственные задачи динамического деформирования и потери устойчивости предварительно нагруженных композитных цилиндрических оболочек исследованы явно недостаточно [10]. Цель данной работы – развитие методики численного исследования нелинейного нестационарного деформирования и потери устойчивости цилиндрических оболочек из композитных материалов при комбинированных квазистатических и динамических воздействиях.

Постановка и метод решения начально-краевой задачи

Рассмотрим цилиндрическую оболочку, образованную перекрестной намоткой однонаправленного композитного материала, в ортогональной криволинейной системе координат α_i ($i = \overline{1, 3}$), совпадающей с линиями главных кривизн и внешней нормалью к внутренней поверхности оболочки. Коэффициенты Ламе: $H_1 = 1$, $H_2 = 1 + k_2\alpha_3$, $H_3 = 1$, главные кривизны: $k_1 = 0$, $k_2 = \frac{1}{R}$, где R – радиус внутренней поверхности оболочки.

Компоненты нелинейного тензора деформаций прикладной теории цилиндрических оболочек можно представить в виде [15]:

$$e_{11} = \frac{1}{H_1} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{13}^2 / 2 + \alpha_3 \chi_{11}),$$

$$e_{12} = \frac{1}{H_1} [\varepsilon_{12} + \varepsilon_{13} \varepsilon_{23} / 2 + \alpha_3 \chi_{12}] + \frac{1}{H_2} [\varepsilon_{21} + \varepsilon_{13} \varepsilon_{23} / 2 + \alpha_3 \chi_{21}],$$

$$e_{13} = \frac{1}{H_1} (\phi_1 + \varepsilon_{13}),$$

$$(1 \leftrightarrow 2)$$
(1)

где

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} + k_1 u_3 , \quad \chi_{11} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha_1} ,$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} , \quad \chi_{12} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha_1} , \quad \varepsilon_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} - k_1 u_1 , \qquad (2)$$

$$(1 \leftrightarrow 2)$$

 $u_i(\alpha_1, \alpha_2, t)$ $(i = \overline{1, 3})$ – перемещения точек внутренней поверхности в направлениях осей α_i , ϕ_j $(j = \overline{1, 2})$ – углы поворота нормали к внутренней поверхности.

Символ $(1 \leftrightarrow 2)$, находящийся один в строке, означает, что каждое приведенное выше соотношение дополняется еще одним соотношением путем замены индексов 1 на 2, 2 на 1. Указанный символ, расположенный в строке с соотношениями, означает ту же операцию с соотношениями этой строки.

Физические соотношения элементарного слоя с учетом гипотез прикладной теории оболочек запишем в виде [16]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \left(A_{11} - \frac{A_{13}^2}{A_{33}} \right) e_{11} + \left(A_{12} - \frac{A_{13}A_{23}}{A_{33}} \right) e_{22}, \\ \sigma_{12} &= A_{66}e_{12}, \\ (1 \leftrightarrow 2), \\ \sigma_{13} &= A_{44}e_{13}, \\ \sigma_{23} &= A_{55}e_{23}, \end{aligned}$$
(3)

где A_{mn} — жесткости однонаправленного слоя, которые вычисляются через модули упругости и коэффициенты Пуассона элементарного слоя и являются ступенчато изменяющимися функциями переменной α_3 .

Определяющие соотношения в изотропной оболочке формулируются на основе дифференциальной теории пластичности с линейным упрочнением [17]

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}e + \frac{E}{2(1+v)}e'_{ij}, \\ e_{ij} &= e'_{ij} + e''_{ij}, \quad e = e_{11} + e_{22} + e_{33}, \\ \dot{e}_{ij} &= \dot{\gamma}S_{ij}, \quad \sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3, \end{aligned}$$
(4)
$$\sum_{i,j=1}^{3} S_{ij}S_{ij} &= \frac{2}{3}\sigma_{*}^{2}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} - \rho_{ij}, \\ \rho_{ij} &= 2ge''_{ij}, \quad e''_{ij} = \int_{0}^{t} \dot{e}''_{ij}dt, \end{aligned}$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; e'_{ij} , e''_{ij} – упругие и пластические компоненты тензора деформации; δ_{ij} – тензор Кронекера; σ_* , g – предел текучести и модуль упрочнения материала; $\dot{\gamma}$ – скалярный параметр.

Энергетически согласованная система уравнений движения прикладной теории цилиндрических оболочек выводится из условия минимизации функционала полной энергии оболочки, который для цилиндрической оболочки, нагруженной динамическим внутренним (внешним) давлением, запишем в виде [17]:

$$\iint_{S} \left[N_{11} \frac{\partial (\delta u_{1})}{\partial \alpha_{1}} + N_{21} \frac{\partial (\delta u_{1})}{\partial \alpha_{2}} + N_{22} \frac{\partial (\delta u_{2})}{\partial \alpha_{2}} + N_{12} \frac{\partial (\delta u_{2})}{\partial \alpha_{1}} - N_{23}^{*} k_{2} \delta u_{2} + N_{13}^{*} \frac{\partial (\delta u_{3})}{\partial \alpha_{1}} + N_{23}^{*} \frac{\partial (\delta u_{3})}{\partial \alpha_{2}} + N_{22} k_{2} \delta u_{3} + M_{11} \frac{\partial (\delta \varphi_{1})}{\partial \alpha_{1}} + M_{21} \frac{\partial (\delta \varphi_{1})}{\partial \alpha_{2}} + Q_{13} \delta \varphi_{1} + M_{22} \frac{\partial (\delta \varphi_{2})}{\partial \alpha_{2}} + M_{12} \frac{\partial (\delta \varphi_{2})}{\partial \alpha_{1}} + Q_{23} \delta \varphi_{2} \right] d\alpha_{1} d\alpha_{2} + \int_{S} \left[\left(\overline{B}_{11} \ddot{u}_{1} + \overline{B}_{12} \ddot{\varphi}_{1} \right) \delta u_{1} + \left(\overline{B}_{11} \ddot{u}_{2} + \overline{B}_{12} \ddot{\varphi}_{2} \right) \delta u_{2} + \overline{B}_{11} \ddot{u}_{3} \delta u_{3} + \left(\overline{B}_{22} \dot{\varphi}_{1} + \overline{B}_{21} \ddot{u}_{1} \right) \delta \phi_{1} + \left(\overline{B}_{22} \dot{\varphi}_{2} + \overline{B}_{21} \ddot{u}_{2} \right) \delta \phi_{2} \right] d\alpha_{1} d\alpha_{2} - \int_{S} F_{3} \delta u_{3} d\alpha_{1} d\alpha_{2} = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{split} &(N_{11}, N_{12}, M_{11}, M_{12}, Q_{13}) = \\ &= \int_{0}^{h} (\sigma_{11}, \sigma_{12}, \alpha_{3}\sigma_{11}, \alpha_{3}\sigma_{12}, \sigma_{13}) H_{2} d\alpha_{3} , \\ &N_{13}^{*} = Q_{13} + N_{11} \varepsilon_{13} + N_{12} \varepsilon_{23} , \\ &(1 \leftrightarrow 2) \\ &\overline{B}_{11} = \rho(h + k_{2} h^{2} / 2); \ \overline{B}_{22} = \rho(h^{3} / 3 + k_{2} h^{4} / 4); \\ &\overline{B}_{12} = \overline{B}_{21} = \rho(h^{2} / 2 + k_{2} h^{3} / 3), \end{split}$$

S – внутренняя поверхность оболочки, F_3 – нагрузка по направлению координатной оси α_3 , ρ – плотность материала оболочки, h – толщина оболочки. Усилия и моменты в соотношениях (5) можно представить через обобщенные деформационные характеристики $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{12}, \epsilon_{21}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}, \chi_{11}, \chi_{22},$ χ_{12}, χ_{21} внутренней поверхности оболочки в виде [18]:

$$\begin{split} N_{11} &= B_{11}\overline{\varepsilon}_{11} + B_{12}\overline{\varepsilon}_{22} + C_{11}\chi_{11} + C_{12}\chi_{22} ,\\ N_{12} &= B_{33}^{11}\overline{\varepsilon}_{12} + B_{33}^{12}\overline{\varepsilon}_{21} + C_{33}^{11}\chi_{12} + C_{33}^{12}\chi_{21} ,\\ M_{11} &= C_{11}\overline{\varepsilon}_{11} + C_{12}\overline{\varepsilon}_{22} + D_{11}\chi_{11} + D_{12}\chi_{22} ,\\ M_{12} &= C_{33}^{11}\overline{\varepsilon}_{12} + C_{33}^{12}\overline{\varepsilon}_{21} + D_{33}^{11}\chi_{12} + D_{33}^{12}\chi_{21} ,\\ Q_{13} &= K_{1}(\varepsilon_{13} + \varphi_{1}) ,\\ (1 \leftrightarrow 2) . \end{split}$$

где

$$\begin{split} \overline{\mathbf{e}}_{11} &= \mathbf{e}_{11} + \mathbf{e}_{13}^{2} / 2, \quad \overline{\mathbf{e}}_{12} = \mathbf{e}_{12} + \mathbf{e}_{13}\mathbf{e}_{23} / 2 \quad (1 \leftrightarrow 2), \\ B_{jj} &= I_{jj}^{(0)}, \quad B_{12} = B_{21} = J_{12}^{(0)}, \quad C_{jj} = I_{jj}^{(1)}, \quad C_{12} = C_{21} = J_{12}^{(1)}, \\ B_{33}^{jj} &= I_{33,jj}^{(0)}, \quad B_{33}^{12} = B_{33}^{21} = J_{33}^{(0)}, \quad C_{33}^{jj} = I_{33,jj}^{(1)}, \quad C_{33}^{12} = C_{33}^{21} = J_{33}^{(1)}, \\ D_{jj} &= I_{jj}^{(2)}, \quad D_{12} = D_{21} = J_{12}^{(2)}, \quad D_{33}^{jj} = I_{33,jj}^{(2)}, \quad D_{33}^{12} = D_{33}^{21} = J_{33}^{(2)}, \\ K_{j} &= h^{2} \left[\sum_{\kappa=1}^{K} \frac{H_{j}^{(\kappa)} h_{\kappa}}{A_{j+3j+3}^{(\kappa)}} \right]^{-1} \quad (j = 1, 2), \quad H_{1}^{(\kappa)} = \frac{(1 + \overline{h_{\kappa}} k_{1})}{(1 + \overline{h_{\kappa}} k_{2})} \quad (1 \leftrightarrow 2), \\ h_{\kappa} &= z_{\kappa} - z_{\kappa-1}, \quad \overline{h_{\kappa}} = (z_{\kappa} + z_{\kappa-1}) / 2, \\ I_{11}^{(i)} &= \frac{1}{i+1} \sum_{\kappa=1}^{K} A_{11}^{(\kappa)} H_{2}^{(\kappa)} (z_{\kappa}^{i+1} - z_{\kappa-1}^{i+1}), \\ I_{33,11}^{(i)} &= \frac{1}{i+1} \sum_{\kappa=1}^{K} A_{12}^{(\kappa)} (z_{\kappa}^{i+1} - z_{\kappa-1}^{i+1}), \\ J_{12}^{(i)} &= \frac{1}{i+1} \sum_{\kappa=1}^{K} A_{33}^{(\kappa)} (z_{\kappa}^{i+1} - z_{\kappa-1}^{i+1}), \\ J_{33}^{(i)} &= \frac{1}{i+1} \sum_{\kappa=1}^{K} A_{33}^{(\kappa)} (z_{\kappa}^{i+1} - z_{\kappa-1}^{i+1}), \\ (1 \leftrightarrow 2). \end{array}$$

 $A_{ij}^{(\kappa)}$ — эффективные жесткостные характеристики элементарного слоя, которые вычисляются через модули упругости и коэффициенты Пуассона; z_{κ} — координаты слоев, отсчитываемые от внутренней поверхности оболочки, K — число слоев.

Минимизация функционала полной энергии оболочки (5) позволяет получить систему уравнений движения

$$L_{1}(N) = B_{11}\ddot{u}_{1} + B_{12}\phi_{1};$$

$$L_{2}(N) + N_{13}^{*}k_{2} = \overline{B}_{11}\ddot{u}_{2} + \overline{B}_{12}\dot{\phi}_{2},$$

$$L_{1}(M) - Q_{13} = \overline{B}_{22}\dot{\phi}_{1} + \overline{B}_{21}\ddot{u}_{1};$$

$$L_{2}(M) - Q_{23} = \overline{B}_{22}\dot{\phi}_{2} + \overline{B}_{21}\ddot{u}_{2},$$

$$L_{1}(T) = \frac{\partial T_{11}}{\partial \alpha_{1}} + \frac{\partial T_{21}}{\partial \alpha_{2}}$$
(6)

$$\frac{\partial N_{13}^*}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial N_{23}^*}{\partial \alpha_2} - k_2 N_{22} + F_3 = B_{11} \ddot{u}_3, \ (1 \leftrightarrow 2)$$

и естественные граничные условия, которые для обеспечения полного закрепления края необходимо принять

$$u_1 = u_2 = u_3 = \phi_1 = \phi_2 = 0. \tag{7}$$

Дополняя соотношения (6), (7) необходимым числом начальных условий

$$\begin{split} u_i(\alpha_1, \alpha_2, 0) &= u_i^0(\alpha_1, \alpha_2), \quad \phi_j(\alpha_1, \alpha_2, 0) = \phi_j^0(\alpha_1, \alpha_2), \\ \dot{u}_i(\alpha_1, \alpha_2, 0) &= \dot{u}_i^0(\alpha_1, \alpha_2), \quad \dot{\phi}_j(\alpha_1, \alpha_2, 0) = \dot{\phi}_j^0(\alpha_1, \alpha_2) \\ (i = \overline{1, 3} ; j = 1, 2), \end{split}$$

получим полную систему уравнений для анализа нелинейных волновых процессов деформации и потери устойчивости цилиндрических оболочек, полученных укладкой элементарных слоев однонаправленного композитного материала.

Критическая нагрузка потери устойчивости определяется по характерному излому на кривой амплитуда воздействия — максимальный прогиб. Численный метод решения сформулированной задачи основывается на явной вариационно-разностной схеме [17, 19]. При этом квазистатический режим нагрузки моделируется заданием внутреннего давления в виде линейно растущей функции с выходом на стационарное значение в течение трех периодов колебаний композитной цилиндрической оболочки по низшей форме.

Результаты исследования

Для обоснования достоверности и точности предлагаемой методики проведено сопоставление численных расчетов с экспериментальными данными [2] по динамической устойчивости изотропных цилиндрических оболочек, предварительно нагруженных внутренним давлением и последующим динамическим внешним давлением с различными скоростями, при этом внешнее давление было равномерно распределено по всей поверхности оболочки.

Геометрические и физико-механические параметры материала оболочки были равны: R/h = 104; L/R = 1,9; E = 73 ГПа; v = 0,3, $\rho = 2700$ кг/м³, $\sigma_* = 0,37$ ГПа; g = 0,6 ГПа, L - длина образующей оболочки.

Статическое внутреннее давление создавалось сжатым воздухом, а динамическое давление осуществлялось в результате электрогидравлического разряда при подрыве калиброванных медных проволочек [2]. При этом закрепление краев оболочки было близко к жесткому защемлению.

На рис. 1 приведены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента динамичности

 $K = \frac{F_3}{F_3^0}$ от скорости нагружения динамическим

внешним давлением \dot{F}_3^+ (F_3^* , F_3^0 – критические на-

грузки потери устойчивости при динамическом и статическом внешнем давлении соответственно). Приведенные результаты получены при статическом внутреннем давлении F_3^- , которое в безразмерном Γ_3^- (р)²

виде определяется выражением
$$\overline{F_3}^- = \frac{F_3}{E} \left(\frac{R}{h} \right)$$
 и в

данном случае равно $F_3^- = 0,07$.





Полученные результаты свидетельствуют о хорошем соответствии расчетов и экспериментальных данных.

На рис. 2 представлены характерные формы потери устойчивости при статическом и динамическом нагружениях с различными скоростями внешнего давления с учетом предварительного внутреннего давления $\overline{F}_3^- = 0.42$.



Рис. 2. Характерные формы волнообразования изотропных цилиндрических оболочек при различных скоростях динамического давления: а – статическое нагружение внешним давлением; б, в, г – динамическое нагружение внешним давлением со скоростями 10, 30, 50 ГПа/с, соответственно

Из приведенных результатов следует, что рост скорости внешнего давления приводит к существенному повышению коэффициента динамической перегрузки, а также подтверждается тенденция увеличения числа волн по окружности и по длине оболочки при увеличении скорости нагружения, отмеченная в работе [2].

Далее рассматривалась цилиндрическая оболочка, выполненная из композитного материала со следующими геометрическими и физико-механическими параметрами материала: R = 0,072 м; R/h = 112; L/R = 2,2; $E_1 = 200 \text{ ГПа}$; $E_2 = E_1/30$; $G_{12} = G_{13} =$ $= G_{23} = E_2/2$; $v_{12} = 0,25$; $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$. Рассматривались оболочки с различными углами армирования и исследовалось влияние предварительной осевой нагрузки на процесс потери устойчивости при динамическом нагружении внешним давлением.

Результаты исследования влияния угла армирования и предварительного статического растяжения или сжатия на процесс потери устойчивости оболочки при последующем нагружении динамическим внешним давлением, равномерно распределенным по всей поверхности оболочки, представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 показаны абсолютные значения максимальных прогибов U_3^* оболочки во времени для различных углов армирования при скорости динамического внешнего давления $F_3 = 5$ ГПа/с, подверженных предварительному осевому растяжению или сжатию уровня 0,05 ГПа.





Характерные формы потери устойчивости оболочки при динамическом нагружении внешним давлением со скоростью $\dot{F}_3 = 5 \Gamma \Pi a/c$ приведены на рис. 4.



Рис. 4. Характерные формы потери устойчивости композитных цилиндрических оболочек ($E_2 = E_1/30$): а – динамическое нагружение; б – динамическое нагружение с учетом предварительного квазистатического растяжения; в – динамическое нагружение с учетом предварительного квазистатического сжатия; I, II, III, IV и V – для углов армирования 0⁰, 15⁰, 30⁰, 45⁰ и 90⁰, соответственно

Из полученных результатов следует, что наличие предварительной осевой нагрузки значительно влияет для структур с углом армирования $0-30^0$, отчетливо видно влияние предварительной осевой нагрузки на характерные формы потери устойчивости. При большем угле армирования оболочка становится слабой к внешнему давлению и формы потери устойчивости практически одинаковы. Для всех углов армирования предварительное растяжение-сжатие незначительно влияет на критическую нагрузку им-

пульса внешнего давления, наибольшее влияние наблюдается для оболочки с углом армирования 45⁰.

Аналогичное исследование проведено для цилиндрической оболочки, выполненной из материала, у которого $E_2 = E_1/2$, остальные характеристики и параметры нагружения те же (указаны выше). На рис. 5 приведены характерные формы потери устойчивости оболочки.



Рис. 5. Характерные формы потери устойчивости композитных цилиндрических оболочек ($E_2 = E_1/2$): а – динамическое нагружение; б – динамическое нагружение с учетом предварительного квазистатического растяжения; в – динамическое нагружение с учетом предварительного квазистатического сжатия ; I – для угла армирования 0^0 ; II – для угла армирования 90^0

Ввиду малого различия значений модулей упругости материала в окружном и продольном направлениях результаты расчетов мало отличаются друг от друга даже для «крайних» вариантов армирования (0 и 90 градусов), влияние предварительной нагрузки малозначительно, хотя наблюдается разница в формообразовании при предварительном сжатии.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Предварительное сжатие или растяжение оболочки, выполненной из композитного материала с большой разницей окружного и продольного модулей упругости, существенно влияет на формы потери устойчивости для углов армирования 0-30 градусов, при этом значения критической нагрузки изменяются незначительно, наибольшая разница наблюдается для угла армирования 45 градусов. Для материала с небольшой разницей модулей упругости варианты при различных углах армирования мало отличаются друг от друга и влияние предварительной нагрузки малозначительно, хотя наблюдается различие форм потери устойчивости оболочки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по Соглашению № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEF157817X0246).

Литература

1. Маневич Л. И., Михайлов Г. В., Павленко И. Д., Прокопало Е. Ф. Исследование устойчивости оболочек при совместном действии статических и динамических нагрузок // Прикладная механика. 1977. Т. XIII. № 1. С. 27–32.

2. Баскаков В. Н., Костоглотов А. И., Швецова Л. А. Исследование динамической устойчивости гладких цилиндрических оболочек // Проблемы прочности. 1982. № 5. С. 31–33.

3. Бендюков В. В., Дерюшев В. В. Динамическая коротковолновая неустойчивость тонкостенных цилиндрических оболочек при локальном действии импульса внешнего давления // Проблемы прочности. 1995. № 4. С.36–43.

4. Скурлатов Э. Д. Экспериментальное исследование поведения цилиндрических оболочек при динамических нагрузках // Проблемы прочности. 1972. № 9. С. 79–83.

5. Костоглотов А. И., Бендюков В. В., Дерюшев В. В., Шевцова Л. А. Исследование процесса потери устойчивости гладких тонкостенных цилиндрических оболочек при локальном действии импульса излучения // Проблемы прочности. 2004. № 5. С. 56–62.

6. Дубровин В. М., Бутина Т. А. Моделирование динамической устойчивости цилиндрической оболочки при действии осевой сжимающей нагрузки // Мат. моделир. и числ. методы. 2015. № 6. С. 46–57.

7. Коломоец А. А., Модин А. С. Нелинейная динамика предварительно нагруженной несовершенной цилиндрической оболочки при действии неравномерного внешнего давления // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. № 80. С. 7–12. 8. Богданович А. Е., Фелдмане Э. Г. Расчет несущей способности композитных цилиндрических оболочек при динамическом нагружении // Механика композит. материалов. 1980. № 3. С. 476–484.

9. Богданович А. Е., Фелдмане Э. Г. Осесимметричное деформирование и прочность слоистых цилиндрических оболочек при осевом ударе // Механика композит. материалов. 1982. № 4. С. 653–662.

10. Богданович А. Е. Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек. Рига: Зинатне, 1987.

11. Викторов И. В., Товстик П. Е. Некоторые задачи устойчивости анизотропных цилиндрических оболочек // Труды XIII Междунар. конф. «Современные проблемы механики сплошной среды». Ростовна-Дону. 2009. Т. І. С. 57–62.

12. Jansen E. L. Dynamic stability problems of anisotropic cylindrical shells via a simplified analysis // Nonlinear Dyn. 2005. Vol. 39. P 349–367.

13. Bisagni C. Dynamic buckling of fiber composite shells under impulsive axial compression // Thin-Walled Struct. 2005. Vol. 43. P. 499–514.

14. Rahman T., Jansen E.L., Gürdal Z. Dynamic buckling analysis of composite cylindrical shells using a finite element based perturbation method // Nonlinear Dynamics. 2011. Vol. 66. N 3. P. 389–401.

15. Шаповалов Л. А. Об учете поперечного обжатия в уравнениях нелинейной динамики оболочек // Известия РАН МТТ. 1997. № 3. С. 156–168.

16. Малмейстер А. К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. Рига: Зинатне, 1980.

17. Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002.

18. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988.

19. Абросимов Н. А., Елесин А. В., Пирогов С. А. Численный анализ неосесимметричного деформирования и прогрессирующего разрушения слоистых композитных цилиндрических оболочек при импульсном нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2015. Т. 77, № 1. С. 23–32.

МНОГОЛУЧЕВАЯ ВЫСОКОПЕРВЕАНСНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА МОЩНОГО ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПРИБОРА

А. Г. Быков, К. В. Троцюк, И. В. Ошкин

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

Введение

Создание мощных электровакуумных приборов с многолучевой электронной пушкой требует решения задач формирования, транспортировки и осаждения высокопервеансного электронного потока, для которого характерны низкая энергия электронов и высокие плотности тока [1–3].

Применение многолучевой конструкции электронной пушки позволяет получить высокий микропервеанс за счет суммирования тока низкопервеансных парциальных пучков. В многолучевой конструкции электронной пушки катодные узлы смещены относительно оси прибора, что приводит к росту поперечных составляющих магнитного поля в катодной области и в каналах транспортировки парциальных пучков. В результате усложняется процесс фокусировки и увеличивается поперечный дрейф парциальных пучков в пролетных каналах, что влечет за собой снижение токопрохождения и ограничение суммарного микропервеанса многолучевого потока. Для устранения данной проблемы необходимо применять в конструкции пушки различные по форме магнитомягкие экранирующие элементы для компенсации поперечных составляющих магнитного поля.

Целью работы является анализ влияния геометрии магнитомягких экранирующих элементов на электрические характеристики многолучевой электронной пушки, получение максимального токопрохождения и микропервеанса многолучевого потока.

Катодная область пушки

В многолучевых СВЧ-приборах используются сплошные пучки, для формирования которых применяют диодные пушки с катодным узлом либо частично, либо полностью экранированным от магнитного поля [4, 5], именно поэтому здесь возникают определенные трудности. Сфокусировать (т. е. получить ламинарный пучок с наименьшими пульсациями) электронный пучок с наименьшими пульсациями) электронный пучок в области вылета электронов из анодного отверстия, а затем и в пролетном канале – сложная задача при разработке электровакуумных СВЧ-приборов. Поэтому важным этапом при построении катодной области является выбор типа электронной пушки с заданной степенью экранировки от внешнего магнитного поля. В качестве базовой конструкции катодного узла для формирования парциального пучка многолучевой электронной пушки воспользуемся модифицированной пушкой Мюллера с фокусирующим электродом (ФЭ) пушки Пирса (см. рис. 1). Такое построение конструкции катодного узла позволяет более эффективно компенсировать расфокусирующие силы пространственного заряда при высоких микропервеансах и тем самым формировать электронный пучок с минимальными потерями тока.



Рис. 1. Конструкция катодного узла

На рис. 2 представлен общий вид конструкции многолучевой электронной пушки в продольном разрезе. Она содержит шесть катодных узлов со сферическими эмиттерами из LaB₆, размещенных по радиусу, которые формируют при ускоряющем напряжении 4 кВ сплошные электронные пучки с током 0,35 А. Суммарный ток многолучевого потока составляет 2 А (микропервеанс 8 мкА/В^{3/2}).

Переходная область пушки

В многолучевой высокопервеансной конструкции пушки, рис. 2, катодные узлы размещаются по радиусу достаточно плотно, при этом размеры экрана отдельно взятого катода становятся малы, вследствие чего происходит насыщение материала экрана и появляется азимутальная неоднородность магнитного поля в переходной области пушки [4]. В стандартных многолучевых пушках экран является общим для всех катодных узлов и располагается с внешней стороны пушки (см. рис. 2а). Однако данный вариант геометрии экрана не позволяет формировать требуемые градиенты продольной составляющей магнитного поля в переходной области и, как следствие, транспортировать интенсивные электронные пучки. Одним из оптимальных конструктивных вариантов экрана является геометрия в виде диска, который содержит отверстия под каждый катодный узел (см. рис. 26).



Рис. 2. Общий вид конструкций многолучевой пушки: а – с железным диском, б – с железным диском с отверстиями

При этом для обеспечения наилучшей фокусировки и однородности магнитного поля необходимо каждое отверстие выполнить в виде усеченного цилиндра, а также внести в конструкцию дополнительный элемент – магнитно-фокусирующий диск (МФД), располагающийся на внешней стороне анода (см. рис. 3). Диск и экран выполняются из магнитомягкого материала, например, из железа армко.



Рис. 3. Конструкция МФС с отверстиями и с МФД

На рис. 4 представлено распределение продольных B_z и поперечных B_y составляющих магнитного поля в области формирования парциальных пучков многолучевого потока для различных вариантов исполнения экранов. Как видно из рис. 4, конструкция, состоящая из диска с отверстиями и МФД, обладает наибольшим градиентом магнитного поля и минимальными поперечными составляющими (кривые 3) в области формирования электронного пучка.



Рис. 4. Продольная составляющая магнитного поля вдоль оси катодного узла: 1 – с железным диском, 2 – с отверстиями в железном диске, 3 – с МФД

Результаты численного моделирования

На рис. 5. показан электростатический потенциал поля отдельной пушки, который проецируется на каждую пушку, вследствие симметрии многолучевой конструкции. Согласно рис. 5 эквипотенциальные линии вблизи катода совпадают с формой эмитирующей поверхности, а в катод-анодном промежутке образуется слабая рассеивающая линза со сферической аберрацией. Сочетание данных условий позволяет формировать и транспортировать электронный пучок с минимальным разбросом по продольным скоростям и обеспечить высокое токопрохождение электронного пучка в СВЧ-приборе.



Рис. 5. Электростатический потенциал поля отдельной пушки: 1 – экран пушки, 2 – ФЭ, 3 – катод, 4 – анод, 5 – МФД

Результаты моделирования электронных траекторий многолучевого потока для каждого из вариантов исполнения магнитного экрана в переходной области (раздел 2) представлены на рис. 6, 7 и 8. Результаты моделирования стандартного конструктивного варианта с железным диском (см. рис. 6), показывают, что все электроны, эмитируемые с поверхности катода, при вылете из анода полностью оседают на поверхности пролетного канала. Это объясняется наличием значительной амплитуды поперечной составляющей магнитного поля (кривая 1 на рис. 4), под воздействием которой при вылете из области катода происходит максимальный рост азимутальной скорости движения электронов и смещение центра парциального пучка к стенке пролетного канала.



Рис. 6. Траектории электронов многолучевой пушки в конструкции конструкции с железным диском

На рис. 7 представлены траектории электронов в конструкции с железном диском, у которого выполнены отверстия для каждого парциального пучка. Согласно представленным результатам траекторного моделирования, весь ток, инжектируемый с поверхности парциального катода транспортируется в пролетном канале без токооседания. Высокое токопрохождение парциальных пучков достигается за счет снижения до минимального уровня поперечной составляющей магнитного поля вдоль осей пролетных каналов (кривая 2 на рис. 4).



Рис. 7. Траектории электронов многолучевой пушки в конструкции с железным диском с отверстиями

При добавлении в конструкцию пушки МФД наблюдается изменение характера распределения поперечной составляющей магнитного поля и уменьшение ее амплитуды до минимального значения в сечении анодного отверстия (кривая 3 на рис. 4). Это приводит к дополнительной фокусировке и снижению величины пульсаций парциальных пучков в пролетном канале (см. рис. 8).



Рис. 8. Траектории электронов многолучевой пушки в конструкции с железным диском с отверстиями и с МФД

На рис. 9 показаны поперечные размеры парциального пучка в пролетном канале на участке сходимости (в сечение кроссовера). При максимальных пульсациях коэффициент заполнения пучком пролетного канала составляет 0,56 и находится в диапазоне допустимых значений.



Рис. 9. Поперечный размер парциального пучка: а – в максимуме пульсации пучка, б – в минимуме пульсации пучка

б

Заключение

Таким образом, результаты анализа влияния геометрии магнитомягких экранирующих элементов на электрические характеристики многолучевой электронной пушки показывают, что для формирования высокопервеансных многолучевых потоков с максимально достижимыми значениями токопрохождения необходимо в конструкции электронной пушки использовать экран с отверстиями в виде усеченного цилиндра для каждого парциального пучка. При этом дополнительная фокусировка парциальных пучков достигается при установке на внешней стороне анода МФД.

Литература

1. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Общая схема разработки электронно-оптических систем в приборах

СВЧ // Сборник докладов Восьмой научно-технической конференции «Молодежь в науке» – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009 г. Вып. 8. С. 492–497.

2. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Оптимизация характеристик магнетронной пушки // Сборник тезисов Девятого Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» – Москва, 2009 г.

3. Елизаров А. А., Ефремова М. В. Системы формирования электронных пучков электровакуумных приборах: современное состояние и тенденции развития // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 70–73.

4. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Электронно-оптические системы приборов сверхвысоких частот. Л.: Энергия, 1965.

5. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ПОРОШКА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЦИРКОНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПИРОТЕХНИЧЕСКОМ СОСТАВЕ СЦМ

<u>Е. Н. Вертей,</u> Д. Г. Иванов, И. К. Кремзуков, Д. В. Чулков, Е. В. Фадеева, О. Ю. Юнчина

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

Введение

В настоящее время актуальной задачей является изготовление пиротехнического состава СЦМ (смесь свинцового сурика, циркония марки ПЦрН-А ТУ 48-4-376-76 и дисульфида молибдена) [1, 2]. Проблема заключается в прекращении производства порошка натриетермического циркония ТУ 48-4-376-76 (производитель Донецкий химико-металлургический завод) [3], который в соответствии с требованиями ТУ на пиротехнический состав СЦМ должен использоваться при изготовлении этого состава. В связи с этим актуальность приобрела разработка технологии изготовления порошка циркония из порошка электролитического циркония для использования в составе СЦМ.

Согласно данным завода-изготовителя порошка электролитического циркония (акционерное общество «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ»)) основная его часть (48–60 %) имеет фракцию частиц 250–600 мкм, а фракция частиц менее 63 мкм составляет менее 1 %. Для достижения крупности порошка не более 100 мкм (согласно ТУ 48-4-376-76) было использовано два способа. В первом из них используется диспергирование порошка электролитического циркония в шаровой мельнице (ШМ) в дистиллированной воде, во втором – метод гидрирования-дегидрирования порошка электролитического циркония.

Целью настоящей работы являлось определение возможности замены порошка натриетермического циркония на измельченный порошок электролитического циркония в пиротехническом составе СЦМ.

Анализ характеристик электролитического циркония

Электролитический порошок циркония получают методом электролиза обычно с использованием расплавленных солей, например, используя расплав $K_2 ZrF_6$ – NaCl [4]. Анализ химического состава порошков показывает, что электролиз приводит к получению более чистого порошка циркония по сравнению с натриетермическим порошком. Общая массовая доля примесей в электролитическом цирконии согласно ТУ 95.259-99 и в натриетермическом цирконии согласно ТУ 48-4-376-76 составляет соответственно: 0,5 % и 6...7 %.

При проведении работ в качестве исходного материала использовали порошок электролитического циркония ТУ 95.259-88 [5] и ТУ 95.259-99 марки ПЦЭ-3Р [6].

Результаты ситового анализа исходного порошка циркония показали, что основную часть (43,1 мас. %) составляет фракция частиц 250–500 мкм, а фракция частиц менее 64 мкм составляет 6,5 мас. %.

Диспергирование в шаровой мельнице

Диспергирование исходного порошка электролитического циркония ТУ 95.259-99 проводили в ШМ в дистиллированной воде при отношении массы твердого материала к массе жидкости, равном 1:2,5. После измельчения для удаления воды из полученной суспензии проводили сушку при температуре 60–70 °С до постоянной массы. Высушенный порошок циркония просеивали последовательно через сита с размером ячейки 500, 250, 100 и 64 мкм.

Получение порошка циркония методом гидрирования-дегидрирования

Технология получения порошка циркония данным методом включает:

 – гидрирование порошка электролитического циркония ТУ 95.259-88 в герметичной реторте;

 измельчение насыщенного водородом порошка циркония в ШМ и последующий просев через сито с размером ячейки 40 мкм;

 – дегидрирование измельченного гидрированного порошка циркония;

– измельчение спека циркония в ШМ и просев порошка циркония через сито с размером ячейки 40 мкм.

Все операции по измельчению и просеву порошка проводили в среде азота с содержанием влаги не более 0,2 г/м³ и кислорода не более 1 об. %.

Результаты исследования и их обсуждение

В дальнейшем тексте «исходный порошок электролитического циркония ТУ 95.259-99» будем называть «материал 1», порошок, полученный диспергированием электролитического циркония в ШМ в воде, будем называть «материал 2», порошок, полученный методом гидрирования-дегидрирования электролитического циркония, будем называть «материал 3».

Исследование структуры и химического состава порошков циркония

Структура поверхности и элементный химический состав порошка циркония были исследованы с помощью комплекса сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского спектрального микроанализа (PCMA) марки FEI Quanta 200 3D.

Получение электронно-микроскопических изображений и РСМА проводили в режиме высокого вакуума (давление менее 1·10⁻⁴ мм рт. ст.) при ускоряющем напряжении 10 и 25 кВ соответственно. Рентгеновский спектральный микроанализ дает информацию о химическом составе поверхностных и приповерхностных слоев материала. Следует отметить, что при проведении анализа содержания газообразующих примесей (например, азота и кислорода) с преимущественно поверхностной локализацией, это содержание по данным РСМА, как правило, оказывается завышенным по сравнению с содержанием этих примесей в объеме частиц материала.

Результаты электронно-микроскопического исследования (см. рис. 1) позволяют заключить, что:

материал 1, в основном, состоит из беспористых частиц неправильной формы с гладкой поверхностью. Размер частиц находится в диапазоне примерно от 40 до 540 мкм, что соответствует понятию «крупный порошок»;

 – габитус частиц материала 2 свидетельствует о его получении из беспористого материала. Форма частиц близка к изодиаметричной. Размер частиц находится в диапазоне от 4 до 40 мкм;

– материал 3 состоит из более мелких частиц. Размер самых крупных частиц не превышает 40 мкм, а мелкие частицы образуют субмикронную фракцию (менее 1 мкм). Крупные и относительно беспористые частицы порошка состоят из зерен-кристаллитов, сопоставимых по размерам с частицами мелкой субмикронной фракции.

Анализ и обобщение информации о структуре поверхности и габитусе частиц порошков циркония, полученных из электролитического циркония, позволяет отметить сходство их внешнего вида с внешним видом частиц порошков натриетермического циркония ТУ 48-4-376-76, преимущественно состоящих из изодиаметричных субмикронных частиц, их агломератов и индивидуальных крупных беспористых частиц. Следует указать, что по данным из литературы [7] порошки циркония, полученные натриетермическим восстановлением, обладают высокой дисперсностью, размер самых мелких частиц составляет 0, 1–0,2 мкм.

Результаты рентгеновского спектрального микроанализа (см. табл. 1) показывают, что в поверхностных и приповерхностных слоях:

 материал 3 содержит значительно больше кислорода по сравнению с материалами 1 и 2;

– в процессе диспергирования электролитического циркония в ШМ происходит незначительное загрязнение порошка циркония примесями железа и титана (а материала 3 также и алюминием), что обусловлено «намолом» конструкционных материалов ШМ и «предысторией» ее использования в предыдущей эксплуатации.

Таблица 1

Обозначение порошка циркония	Технология	Массовое содержание элементов, %								
	изготовления	Zr	0	N	F	Ti	Fe	Al		
Материал 1	ТУ 95.259-99	90,8(10)	5,3(7)	3,2(6)	0,76(16)	-	-	-		
Материал 2	Измельчение в ШМ	87,8(2)	6,67(11)	4,0(2)	0,47(2)	0,30(3)	0,76(4)	_		
Материал 3	Гидрирование- дегидрирование	85,1(4)	10,2(3)	3,99(10)	0,32(4)	0,21(5)	0,1 (1)	0,11 (3)		

Результаты рентгеновского спектрального микроанализа образцов порошка циркония

В скобках около средних значений соответствующих параметров представлено среднее квадратическое отклонение (СКО), относящееся к последней значимой цифре



Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения порошков электролитического циркония с результатами измерения размеров: а – материал 1 при увеличениях 200×; б – материал 1 при увеличениях 6000×; в – материал 2 при увеличениях 1600×; г – материал 2 при увеличениях 6000×; д – материал 3 при увеличениях 800×; е – материал 3 при увеличениях 6000×

Исследования порошков циркония физико-химическими методами

Исследование кристаллической структуры и микроструктуры порошков циркония проводили методом рентгенодифракционного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Согласно данным рентгеновской дифракции диспергирование в ШМ способствует частичной аморфизации материала 2, что отражается на увеличении уровня фона (см. рис. 2). Высокоэнергетическое воздействие на порошок циркония в ШМ способствует как фрагментации структуры (т. е. уменьшению эффективного размера областей когерентного рассеяния), так и развитию пластической деформации (т. е. увеличению микродеформаций), что отражается на уширении рефлексов дифрактограммы. Анализ профильных параметров α-Zr после измельчения в ШМ позволил установить, что основным фактором, обуславливающим уширение рефлексов на дифрактограмме материала 2, является фрагментация структуры.

Результаты анализов (см. табл. 2) показывают, что диспергирование порошка электролитического циркония в ШМ приводит к увеличению содержания водорода в измельченном материале. Разброс значений удельного газосодержания (ГС) в материале 2 по данным волюмометрического метода анализа и измерений на газоанализаторе Eltra ONH-2000 обусловлен, вероятнее всего, неоднородностью распределения газообразующих примесей в частицах материала. Материал 3 характеризуется высоким содержанием дефектных оксидных фаз, что приводит к значительному уширению их рефлексов (см. табл. 2 и рис. 2). Вероятно, это обусловлено тем, что окисление сопровождается измельчением в ШМ. Анализ профильных параметров α -Zr после измельчения в ШМ показал, что основным фактором, обуславливающим уширение рефлексов в материале 3, является пластическая деформация. Высокое содержание поверхностных оксидных фаз в материале 3 согласуется с результатами рентгеновского спектрального микроанализа (см. табл. 1).



Рис. 2. Дифрактограммы порошков циркония: а – материал 1, б – материал 2, в – материал 3

Таблица 2

Результаты количественного рентгенофазового анализа, элементного анализа и определения общего и активного циркония

05		Массовое содержание, %									
Ооозначение	Технология	Кристаллические фазы						06 7-	A	ГC,	
порошка циркония	изготовления	α-Zr	$\delta\text{-}ZrH_x$	γ -ZrH _x	ZrO_2	0	Ν	н (не более 0,2)**	Оощ. Zr (93,0–94,0)**	Акт. Zr (73,0–76,9)**	см ³ /г
материал 1	ТУ 95 259-99	основная	-	следы	следы	0,060(3)	-	0,020 (1)	-	—	-
материал 2	измельчение в ШМ	61,0(4) 46,608(3) *	21,3(2)	16,3(2)	следы	5,15(12)	0,030(4)	0,510(5)*** 0,610(5)	94,35(5)	78,26(21)	47,7
материал 3	гидрирование- дегидрирование	83,2(2) 47,27(6)*	следы	-	12,6(4)	4,78(2)	0,480(7)	0,0300(1)	95,3(5)	82,0 (20)	4,2

* Объем элементарной ячейки, 10⁻³ нм³; согласно базе порошковый данных PDF-2 для стандарта α-Zr (01-078-2921) объем элементарной ячейки составляет **46,59·10⁻³** нм³;

** Требования ТУ 48-4-376-76 для марки ПЦрН-А;

***Результаты параллельного измерения двух различных образцов одной партии: 0,51 % или 57,1 см³/г, 0,61 % или 68,3 см³/г; В скобках около средних значений соответствующих параметров представлено СКО, относящееся к последней значимой цифре

Следует заметить, что значения содержания кислорода в материалах 2 и 3 сопоставимы и составляют около 5 % (см. табл. 2). Однако в материале 2 оксидные фазы идентифицированы в следовых количествах и объем элементарной ячейки α-Zr значительно не отличается от значения объема, приводимого в базе данных для порошков PDF-2. С другой стороны, согласно данным рентгеновского спектрального микроанализа (см. табл. 1) содержание кислорода на поверхности частиц материала 2 заметно меньше по сравнению с содержанием кислорода на поверхности частиц материала 3. Наблюдаемое противоречие, полученное в результатах анализа двумя методами, может быть обусловлено особенностями структуры аморфизированной части материала 2, фазовый состав которого определить не представляется возможным.

Результаты анализов (см. табл. 2) показывают, что диспергирование порошка электролитического циркония в ШМ приводит к увеличению содержания водорода в измельченном материале. Разброс значений удельного газосодержания (ГС) в материале 2 по данным измерений волюмометрическим методом анализа и измерений на газоанализаторе ELTRA ONH-2000 обусловлен, вероятнее всего, неоднородностью распределения газообразующих примесей в частицах материала.

Содержание азота, равное 0,48 % в материале 3, объясняется проведением ряда технологических операций при получении порошка методом гидрирования-дегидрирования в среде азота (загрузка порошков в ШМ и выгрузка из ШМ). Исходя из анализа данных, представленных в табл. 2, можно предполагать, что азот в материале 3 содержится в виде твердого раствора внедрения в решетке α-Zr.

Содержание общего и активного циркония в порошках циркония определяли методом термогравиметрического анализа (ТГА) на приборе фирмы Mettler Toledo – TGA/SDTA 851° LF/1600.

Значения содержания общего циркония по результатам ТГА выше на ~0,7...0,8 мас. % по сравнению со значениями, получаемыми по методике определения содержания общего циркония согласно ТУ 48-4-376-76¹.

Гранулометрический состав порошков циркония (см. табл. 3) оценивался методом лазерной дифракции на приборе «Микросайзер 201А». Однако, согласно ТУ 48-4-376-76 гранулометрический состав необходимо определять по методу Фигуровского. Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной адсорбции азота по методу БЭТ на приборе TriStar 3000.

теновского спек- необходимо учитывать, является чувствительность к л. 1) содержание электрической искре. ц материала 2 за- Чувствительность к электрической искре и к ме-

ханическому воздействию (трению) для измельченного порошка циркония и состава СЦМ на его основе определяли по ОСТ В84-1909 и ОСТ 3-6609 соответственно.

Материал 1 показал «низкую» степень чувствительности к электрической искре – при максимально возможной энергии установки в 2,94 Дж порошок материала не воспламенился. Степень относительной опасности ручных работ при воздействии трением – средняя, класс относительной опасности ручных работ – 11.

Материалы 2 и 3 показали очень высокую степень чувствительности к электрической искре (см. табл. 3). Это может быть обусловлено:

высокой дисперсностью измельченных материалов;

 интенсивной механоактивацией материалов, протекающей по различным механизмам;

 – локальным разрушением дефектной оксидной пленки на поверхности частиц при воздействии шарами в ШМ.

В работе [0] указано, что причиной высокой пирофорности порошков металлов и сплавов является их высокоразвитая удельная поверхность.

В целях обеспечения условий безопасной работ по изготовлению состава СЦМ необходимо снижение степени чувствительности к электрической искре получаемых порошков циркония.

В данной работе был изготовлен состав СЦМ только на основе материала 2. Состав СЦМ показал высокую степень чувствительности к электрической искре, высокую степень относительной опасности ручных работ при воздействии трением, класс относительной опасности ручных работ – 7. Следует указать, что данные характеристики чувствительности к электрической искре и к трению изготовленного состава СЦМ соответствуют характеристикам чувствительности, указанным в технических условиях на пиротехнический состав СЦМ [2].

Чувствительность порошков циркония к электрической искре

мельченного порошка циркония в качестве исходно-

го компонента для приготовления состава СЦМ од-

ним из основных параметров безопасности, который

При изучении возможности применения из-

¹ Результаты анализа методом ТГА получили следующие сотрудники: А. Ю. Постников, А. Я. Малышев и В. Н. Лошкарев в 2006 г. Результаты анализа по методике согласно ТУ 48-4-376-76 получили Л. А. Никитина и Н. А. Ларичева в 1996 г.

Результаты определения гранулометрического состава, удельной поверхности и чувствительности к электрической искре циркония

Обозначение порошка циркония	Технология	Гранулом	S _{edt} ,	Чувствительность к электрической искре				
	изготовления	менее 10 мкм (44–58)*	10-20 мкм (20-47)*	20-50 мкм (10-22)*	м ² /г	W _{50%} , мкДж	₩ _{1%} , мкДж	степень
Материал 1	ТУ 95 259-99	-	-	_	0,03**	-	-	низкая
Материал 2	измельчение в ШМ	45,5	30,3	18,9	1,97(7)	28,1	12,8	очень высокая
Материал 3	гидрирование- дегидрирование	65,5	20,7	13,2	1,34(5)	77,3	23,0	очень высокая

* Требования ТУ 48-4-376-76 для марки ПЦрН-А;

** Оценка удельной поверхности, результаты выходят за нижнюю границу измерения на приборе TriStar 3000, равную 0,05 м²/г; W_{50%} – энергия электрической искры, приводящая к 50 %-ной вероятности воспламенения;

W_{1%} – энергия электрической искры, приводящая к 1 %-ной вероятности воспламенения;

В скобках около средних значений соответствующих параметров представлено СКО, относящееся к последней значимой цифре

Заключение

На основе порошка электролитического циркония диспергированием в ШМ в дистиллированной воде и методом гидрирования-дегидрирования были получены мелкодисперсные порошки циркония и исследованы их физико-химические характеристики.

Для подтверждения соответствия гранулометрического состава и содержания общего и активного циркония в порошке циркония, получаемого из порошка электролитического циркония, характеристикам порошка циркония марки ПЦрН-А ТУ 48-4-376-76 в будущей работе необходимо использовать методики анализа, приведенные в ТУ 48-4-376-76.

Дальнейшие работы по определению возможности замены порошка натриетермического циркония на измельченный порошок электролитического циркония необходимо направить на обеспечение наиболее полного соответствия характеристик получаемых порошков характеристикам порошка натриетермического циркония [3] и на поиск и экспериментальную проверку способов снижения чувствительности порошков циркония и состава СЦМ к электрической искре.

Авторы доклада выражают благодарность Д. А. Блинову, Н. В. Денисовой, И. М. Кузяеву и Г. В. Лыковой за проведение испытаний исследуемых материалов на чувствительность к электрической искре и к трению. В. В. Мокрушину и И. А. Царевой – за проведение электронно-микроскопических исследований. П. Г. Бережко и М. В. Цареву – за полезные замечания.

Литература

1. Пат. 2297404 РФ, С06В 33/00 (2006.1). Пиротехнический состав / А. С. Малышев, М. В. Харламов, В. В. Ярошенко, А. Я. Малышев, И. К. Кремзуков, О. Л. Игнатов // 2007. Бюл. № 11.

2. Состав СЦМ. Технические условия. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.

3. Порошок циркония натриетермический. Технические условия ТУ 48-4-376-76. Министерство цветной металлургии СССР, 1977.

4. Барышников Н. В., Гегер В. Э., Денисова Н. Д., Казайн А. А., Кожемякин В. А., Нехамкин Л. Г., Родякин В. В., Цылов Ю. А. // Металлургия циркония и гафния. М.: Металлургия, 1979. С. 159–161.

5. Цирконий. Порошок электролитический. Технические условия ТУ 95.259-88. 1987.

6. Цирконий. Порошок электролитический. Технические условия ТУ 95 259-99. 1999. (введены взамен ТУ 95.259-88).

7. Мадякин Ф. П. Цирконий. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. Второе изд. М.: Янус-К, 2000. С. 582–583.

8. Попов Б. И., Брейтер А. Л. Воспламеняемость алюминиево-никелевых порошков // Порошковая металлургия. 1973. № 5. С. 101–106.

ВЗРЫВНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ПАКЕТА СТРОП В ВЕРТЛЮГЕ ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЫ

<u>Д. М. Гагаркин</u>, И. Г. Галиуллин, А. Ю. Гармашев, А. В. Сарафанников, В. И. Махров, О. В. Костицын, Д. В. Фролов, С. М. Ульянов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В докладе представлен краткий обзор основных этапов разработки и испытания взрывного устройства – детонирующего удлиненного заряда (ДУЗ), предназначенного для разделения пакета строп в вертлюге парашютной системы.

Ключевые слова: Детонирующий удлиненный заряд, высокостабильный детонирующий шнур (ВДШ), инициирование, испытание.

В составе многих современных летательных аппаратов имеются отделяемые (разделяемые) элементы и узлы. Как правило, для отделения используются устройства, в составе которых содержаться пороха или (и) взрывчатые вещества. Одним из таких взрывных устройств является ДУЗ, предназначенный для установки в вертлюг парашютной системы (ПС), и, являющийся частью ПС. Назначение ДУЗ – надежное разделение (разрезание) трех пакетов строп парашюта, состоящего из 32 текстильных лент, после срабатывания электродетонатора. Суммарная толщина пакета лент 13 мм (без нагрузки на стропы парашюта). Длина ДУЗ составляет 79 мм. Вертлюг с ДУЗ размещается в негерметичном контейнере возвращаемого аппарата (ВА). ДУЗ вертлюга функционирует на заключительном этапе работы ПС, поэтому, согласно требованиям технического задания (ТЗ), он должен сохранять работоспособность после всех внешних воздействий во время полета, в том числе на окололунную орбиту.

ДУЗ должен срабатывать в следующих условиях:

-высота – от 0 до 2,0 км над уровнем моря;

- давление - от 770 до 596 мм рт. ст.;

- температура - от -50 до +50 °C.

Выбор конструкции ДУЗ

Для разрезания взрывом различных преград небольшой толщины, трубопроводов, тросов, кабелей широко применяются ДУЗ, имеющие в своей конструкции кумулятивную выемку. Такие заряды еще называют УКЗ. За счет использования кумуляции ДУЗ более эффективны при резании различных материалов, по сравнению с зарядами без кумулятивной выемки [1–5]. Наиболее распространенные сечения линейных УКЗ и их расположение относительно преграды показаны на рис. 1.



Рис.1. Наиболее распространенные сечения УКЗ: а – в – клиновидная облицовка; г – полуцилиндрическая облицовка; *I* – оболочка; *2* – заряд ВВ; *3* – металлическая облицовка; *4* – преграда

При проектировании ДУЗ из всего многообразия форм УКЗ была выбрана наиболее технологичная – медная трубка с полуцилиндрической кумулятивной выемкой (рис. 2), для снаряжения было выбрано пластичное ВВ на основе ТЭНа.



Рис. 2. Конструктивные размеры ДУЗ (УКЗ)

Расчет конструкции ДУЗ

С помощью пакета САПР были выполнены газодинамические расчеты предпочтительного размеров ДУЗ для наиболее эффективного и надежного разрезания строп.

Расчеты велись по Лагранж–Эйлеровому алгоритму с использованием сетки 0,1 мм для всех областей. Постановка задачи была планарной, то есть рассматривалось поперечное сечение ДУЗ и преграды. Задавалась мгновенная детонация всего слоя ВВ, что имитировало скользящую по ДУЗ детонационную волну.

Расчеты работы ДУЗ сравнивались с пробитием индикаторной преграды в эксперименте. Преградой была монолитная пластина из алюминиевого сплава АМгб или стали СтЗ. Дополнительно расчетами оценивалось влияние точки инициирования ДУЗ на эффективную глубину пробития, форму и направление движения струи. Окончательные расчеты резания проводились для ДУЗ в стальном корпусе конструкции, максимально приближенной к реальной конструкции ДУЗ в вертлюге ПС.

Сравнение глубины и формы расчетной каверны с экспериментом (преграда из алюминия АМг6) для ДУЗ диаметром 16 мм показано на рис. 3. Видно, что согласование для данного случая удовлетворительное. На рис. 4 аналогичное сравнение приведено для стальной преграды и ДУЗ диаметром 12 мм, согласование также удовлетворительное.



Рис. 4. Сравнение расчетной и экспериментальной каверны для ДУЗ диаметром 12 мм

На рис. 5 показан расчет влияния точки инициирования на работу ДУЗ. Возникающая кумулятивная струя в основном движется в направлении инициирования, а не вдоль плоскости симметрии ДУЗ, как необходимо. В этом случае струя по стропам будет скользящей под острым углом, что значительно увеличит необходимую глубину резания, уменьшит контактное давление на границе реза и увеличит ширину зоны реза. Кроме того, возникающий боковой дрейф струи от несимметричного схлопывания кумулятивной выемки приводит к появлению змееподобной струи, что также уменьшает ее пробивное действие. Все это – негативные факторы. Поэтому для достижения оптимальных режимов резания необходимо инициирование ДУЗ вдоль оси заряда.





Рис. 3. Сравнение расчетной и экспериментальной каверны для ДУЗ диаметром 16 мм



Испытания и подтверждение конструкции на макетах

Испытания по подтверждению выбора размера ДУЗ проводились с помощью экспериментальных узлов, представленных на рис. 6.



Рис.6. Схема экспериментального узла: а – инициирование с торца; б – инициирование через боковую поверхность под углом 40⁰: 1 – электродетонатор (ЭД); 2 – пруток ВВ; 3 – стропы; 4 – ДУЗ; 5 – стальная подложка; 6 – плита-основание; 7 – прижим

С помощью ЭД 1 осуществлялось инициирование прутка BB 2, который, передавал детонацию ДУЗ 4. Стропы 3 располагались на стальной подложке 5, а прижим 7 обеспечивал их фиксацию относительно ДУЗ. В опытах варьировались геометрические размеры ДУЗ, число строп и фокусное расстояние. Полученные результаты представлены в табл. 1.

ДУЗ для испытаний изготавливался в РФЯЦ-ВНИИТФ, при этом размеры *D*, *d*, *б* и *F* выбирались согласно рекомендациям, приведенным [2, 5].

По результатам испытаний экспериментальных узлов (табл. 1) было получено, что ДУЗ диметром 12 мм при инициировании с торца полностью перерезает двойное количество строп. Таким образом, можно обеспечить высокую надежность работы разрабатываемого изделия. Полученный результат согласуется с проведенными расчетами.

На рис. 7, в качестве примера, показан рез от ДУЗ диаметром 12 мм по стропам и стальному основанию.

Таблица 1

		0	пытные данные						
	диаметр кумулятивн выемки Ød, мм		MM	высота	Н, мм		ие		дное
Диаметр <i>О</i> D, мм	теорети- ческая	факти- ческая	толщина стенки t,	теорети- ческая	факти- ческая	масса BB, г/мм	фокусное расстоян $F,{\sf MM}$	ММ	разрезано строп/исхо количество стро
		44,5			6,4	0,05	12	ка),	20/30
9	3 78-3 96	33,5	0.75	72	6,4	0,05	12,5	XCLC	24/30
	5,70 5,50	44,5	0,75	7,2	6,2	0,04	11,5	одсо	9/30
		33,5			6,6	0,04	9	а (п	9/32
0.5	2 00 4 19	4	0.65	76	7,4	0,06	9,5	рад	32/32
9,5	3,99-4,18	3,5	0,05	7,0	7,5	0,06	9,5	Iper	29/32
10	42.44	4 45	0.5	8	7,7	0,06	10	I RG	32/32
10	4,2-4,4	44,5	0,5	0	8,0	0,07	5	ЛЬН	19/32
					9,6		12	Ста	30/30
					9,6]	6		30/30
12	504 5 28	5 5 5	0.8	0.6	9,7	0.00	12		40/40
12	3,04-3,28	55,5	0,8	9,0	9,7	0,09	9		48/48
					9,7		9		52/52
					9,7		9		64/64
16	672704	6,57,0	0.75	12.8	12	0,18	16		30/30
10	0,72-7,04	~8	0,75	12,8	12,22	0,18	8		30/30
			Ин	ициирование	через бокову	ю поверхн	ость		
10	5.04.5.00		0.0	0.6	9,7	0.00	12		32/32
12	5,04-5,28	33,3	0,8	9,0	9,6	0,09	9		22/64

Результаты испытаний ДУЗ



Рис. 7. Рез от ДУЗ, инициированного с торца

Выбор способа инициирования ДУЗ

Расчетами было показано, что для достижения оптимальных режимов резания необходимо инициировать ДУЗ вдоль оси заряда. Согласно ТЗ конструкция вертлюга ПС, предусматривает инициирование ДУЗ от электродетонатора через боковую поверхность ДУЗ, под углом 40⁰ от плоскости симметрии заряда (рис. 8), что существенно снижает эффективность резания.

Для перехода к инициированию вдоль оси ДУЗ был выбран вариант инициирования с использованием радиального концевика представленного на рис. 9. Концевик состоит из детонационного шнура ВДШ-0,8 и усилительного заряда ТЭНа, заключенного в алюминиевый корпус.

С помощью радиального концевика детонационный сигнал от электродетонатора передается на торец заряда и инициирует его вдоль оси (рис. 10). Такая схема позволяет инициировать ДУЗ вдоль оси заряда и избежать возникновения бокового дрейфа струи от несимметричного схлопывания кумулятивной выемки.



Рис. 8. Схема расположения ДУЗ в корпусе вертлюга



Рис. 9. Радиальный концевик


Рис. 10. Схема инициирования ДУЗ

Проверка инициируемости ВДШ-0,8

Проверка надежности инициирования ВДШ-0,8 от ЭД через воздушный зазор осуществлялась с помощью ЭУ, показанного на рис. 11.

В ЭУ воздушный зазор обеспечивался с помощью двух равных по высоте пластин. ВДШ-0,8 укладывался в паз стальной подложки, глубина пазов 1,5; 2,0 и 2,5 мм, ширина паза оставалась неизменной 1,5 мм.



Рис. 11. ЭУ для оценки инициируемости ВДШ-0,8 через воздушный зазор

Целью данного эксперимента являлось определение предварительной оценки максимальной величины воздушного зазора, при котором будет обеспечиваться стабильное инициирование ВДШ-0,8. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Согласно полученным результатам инициирование ВДШ-0,8 от детонатора обеспечивается при воздушном зазоре, значительно превышающем значение, обеспечиваемого конструкцией ПС, равное 3 мм.

инициирование БДШ-0, 8 через воздушный заз	Инициирование	ВДШ-0,8 чере	з воздушный зазо
--------------------------------------------	---------------	--------------	------------------

Nº	Глубина паза, мм	Размер воздушного зазора, мм	Срабатывание (+) либо отказ (–), в каждую сторону от места инициирования	
1	1,5	0	+ +	
2	1,5	7,1	+ +	
3	1,5	12,1	+ +	
4	1,5	14,0	+ +	
5	1,5	18,0	+ +	
6	2,0	2,0	+ +	
7	2,0	6,0	+ +	
8	2,0	10,0	+ +	
9	2,0	13,9	+ +	
10	2,0	18,2	+ -	
11	2,0	21,8	+ +	
12	2,5	4,0	+ +	
13	2,5	6,0	+ +	
14	2,5	7,0	+ +	
15	2,5	7,5	+ +	
16	2,5	8,0	+ -	
17	2,5	8,5	+ +	
18	2,5	9,0	+ +	
19	2,5	10,0	+ -	

Испытания по подтверждению работоспособности ДУЗ

По результатам экспериментальной отработки на макетах была определена окончательная конструкция ДУЗ. В РФЯЦ-ВНИИТФ были изготовлены опытные образцы ДУЗ для проведения испытаний по подтверждению работоспособности, внешний вид которых представлен на рис. 12.



Рис. 12. Внешний вид опытных образцов ДУЗ

В ходе испытаний была проверена работоспособность трех ДУЗ при температуре окружающего воздуха минус 5 °C, температурах плюс 50 °C и минус 50 °C. Внешний вид экспериментального узла, подготовленного к подрыву представлен на рис. 13.



Рис. 13. Внешний вид ЭУ, подготовленного к подрыву: 1 – ДУЗ; 2 – имитатор вертлюга; 3 – макет строп

Охлаждение ЭУ проводилось в контейнере парами жидкого азота. Температура в объеме контейнера контролировалась датчиками (медный термометр сопротивления).

Нагрев ЭУ проводился в нагревательном устройстве тепловой установки «TO-1». В качестве теплоносителя, задающего температуру ЭУ, выступал воздух, нагрев которого регулировался по показаниям термопары (тип ХК), установленной вблизи ЭУ. Режим нагрева «TO-1» задавался с помощью системы управления электронагревательными устройствами.

Общий вид ЭУ после испытаний представлен на рис. 14.



Рис. 14. ЭУ, после испытаний по проверке работоспособности ДУЗ

По результатам испытаний установлено, что ДУЗ обеспечивает заданные требования ТЗ по работоспособности при температурах от минус 50 °C до плюс 50 °C.

Выводы

В ходе проделанной работы была определена конструкция ДУЗ, проведены расчеты и отработка изделия на макетах, изготовлены опытные образцы, успешно прошедшие испытания по подтверждению работоспособности в соответствии с требованиями ТЗ.

Литература

1. Ладов С. В., Кобылкин И. Ф. Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1995.

2. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии : учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

3. Физика взрыва. 3-е изд., перераб. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.

4. Аттетков А. В., Гнускин А. М., Пырьев В. А., Сагидуллин Г. Г. Резка металлов взрывом М.: СИП РИА, 2000.

5. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев, 2005.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

<u>М. Е. Гонов</u>, Т. Н. Южина

Научно-исследовательский институт механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Введение

Не сегодняшний день тематика изучения динамических свойств хрупких материалов, в частности бетона и его разновидностей, остается актуальной. Это связано с неоднородностью бетонов и его разновидностями. Поэтому динамические испытания не должны иметь ограниченный характер. Они должны проводиться с определенной периодичностью для разных видов бетона с целью получения наиболее полной картины их динамических свойств. Успешно созданной и результативно применяемой методикой изучения динамических свойств материалов является использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы [1]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для данного метода необходимы образцы круглого сечения, диаметр которых зависит от диаметра мерных стержней, применяемых в испытательной установке. В случае с бетонными образцами возникает ряд сложностей при их изготовлении. Целью данной статьи является описание методики изготовления бетонных образцов, рассмотрение достоинств и недостатков разных методов, обзор необходимых инструментов и применяемого оборудования. По результатам испытаний пробной серии образцов приводится диаграмма деформирования.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки на сжатие по методу Кольского

Требования, предъявляемые к образцам

В методе Кольского испытываемый образец устанавливается между двух точно расположенных и соосных относительно друг друга мерных стержней (рис. 2). Для передачи ударного импульса от нагружающего стержня в образец и далее в опорный стержень необходимо обеспечить плотное прилегание испытуемого образца к торцам мерных стержней.

В связи с этим, метод Кольского предъявляет к образцам ряд высоких требований, таких как: однородность материала, точность и одинаковость диаметра и длины образца; параллельность двух граней образца и их гладкость (наличие плоскости). Обязательно должна присутствовать вертикальность образца, т. е. отсутствие эксцентриситета, вызывающего изгиб. В идеале образец должен представлять собой геометрически точный цилиндр с соотношением диаметра к длине от 1 до 2. Оптимальная длина образца должна быть в два раза меньше его диаметра для снижения эффекта инерции и трения. При испытании на сжатие диаметр образца не должен превышать диаметр мерных стержней. Например, для мерных стержней диаметром 20 мм, диаметр образца должны быть не более 20 мм, а его длина должна быть в два раза меньше – 10 мм (рис. 3).

При испытаниях образца в обойме на одноосную деформацию диаметр образца должен совпадать с диаметром стержней или быть чуть больше. При испытаниях на растяжение, в случае использования резьбовых обойм, к которым клеится образец, его диаметр должен быть близким к диаметру стержней.

Хорошо известно, что бетон — неоднородный материал, при этом трудно обрабатываемый. Поэтому для снижения масштабного эффекта при использовании мерных стержней диаметром от 20 до 60 мм желательно испытывать мелкозернистый бетон с фракциями наполнителя от 1 до 5 мм. В бетонных образцах должно быть минимизировано, а лучше исключено наличие сколов и пустот. В целом можно сделать вывод, что к образцам предъявляются высокие требования, а, следовательно, и к методике их изготовления.



Рис. 2. Фото экспериментальной установки по методу Кольского



Рис. 3. Геометрические параметры образца

Обзор используемых инструментальных установок для изготовления образцов

Существует две технологии изготовления бетонных образцов для динамических испытаний: отливка бетонной смесью образцов в формообразующих емкостях и высверливание или бурение образцов из существующих бетонных изделий и конструкций. В первом случае технологии изготовления необходиа формообразующая емкость, а так же установки и приспособления для уплотнения бетонной смеси.

Наиболее полезно рассмотреть технологические установки, примененные на практике, для второго метода изготовления бетонных образцов. Это установки для резки, бурения и сверления цельных бетонных материалов. Среди них буровая установка Hilti DD130 для алмазного бурения с электрическим приводом (рис. 4).



Рис. 4. Буровая установка Hilti DD130

Данная установка предназначена как для ручного использования, так и для работы с закреплением на станине. Следовательно, можно получить бетонные образцы как из существующих бетонных конструкций с целью их обследования, так и изготавливать образцы из небольших готовых бетонных изделий в лабораторных условиях. Достоинства данной установки: наличие высококачественных алмазных буровых коронок большой длины и разных диаметров; возможность получать образцы из существующих конструкций; удобство при изготовлении образцов больших диаметров (60 мм); бурение как в мокром, так и в сухом режимах. Недостатки: высокая стоимость установки и буровых коронок; сложности при изготовлении образцов малых диаметров (20 мм); необходимость создания специальной площадки для работы в лабораторных условиях.

Следующая установка — камнерезный станок Cedima CTS-57 G для резки кирпича, клинкера, натурального камня, бетона и других материалов (рис. 5).



Рис. 5. Камнерезный станок Cedima CTS-57 G

Данный станок позволяет нарезать бетонные изделия необходимых размеров. Для охлаждения вода подается прямо из ведра на режущий диск. Грязная вода остается в ванне, где загрязнения отделяются. Через переливную заглушку в ванне вода возвращается в ведро и используется повторно. К примеру, можно нарезать бетонные пластины, из которых затем высверлить образцы для динамических и статических испытаний. Также на данном станке можно напилить и получить образцы требуемой толщины из бетонных кернов большого диаметра (60 мм), полученных при бурении готовых бетонных конструкций и изделий.

Последняя из обозреваемых установок – настольно-сверлильный станок HC-12M для высверливания образов алмазными коронками из бетонных пластин требуемой толщины (рис. 6).



Рис. 6. Настольно-сверлильный станок

Станок прост в использовании, возможно применение коронок разного диаметра, однако для получения хорошего результата необходимо закреплять бетонную пластину и следить за перпендикулярностью оси коронки и основания станка.

Также необходим мелкий вспомогательный инструмент (рис. 7):



Рис.7. Вспомогательный инструмент

• Буровые алмазные коронки для керамогранита. В нашем случае это коронка диаметром 22 мм (Зубр) для получения образцов диаметром чуть менее 19 мм (под стержни 20 мм). А также коронка диаметром 25 мм для получения образов диаметром чуть более 20 мм для испытаний в обойме.

• Измерительный инструмент: уголок 90 град. (для проверки перпендикулярности станка, исходных бетонных изделий); линейка и цифровой штангенциркуль (для точного измерения образцов и промежуточных замеров);

• Струбцины для закрепления бетонных изделий с небольшим весом.

Методы изготовления бетонных образцов

Рассмотрим более подробно две технологии изготовления бетонных образцов для динамических испытаний, их достоинства, недостатки и способы оптимизации.

Отливка бетонной смесью образцов в формообразующих емкостях

Бетонные образцы можно получить посредством заливки бетонной смеси в формообразующие пластиковые трубы. Процесс изготовления образцов состоит из нескольких этапов. Сначала необходимо подобрать состав бетонной смеси. Далее залить пластиковую трубу требуемого диаметра и тщательно уплотнить бетонную смесь, чтобы исключить наличие пустот. После этого необходимо выждать время набора марочной прочности бетоном. Когда прочность достигает нужного значения, можно приступать к нарезке пластиковой трубы с бетоном на образцы нужной длины, посредством камнерезного станка. Теперь главная задача аккуратно извлечь бетонный образец из пластикового кольца либо посредством выталкивания образца, либо за счет разрезки кольца в продольном направлении ножовкой. Именно на этом этапе возникают основные сложности, связанные с отколом крайних граней образца. Следовательно, для более простого извлечения образца, перед заливкой бетонной смесью, необходимо смазать пластиковую трубу для уменьшения сцепления бетонной смеси со стенками трубы.

Достоинствами данного метода является возможность получения образцов различных диаметров за счет большого ассортимента пластиковых труб. Относительная простота при наличии опыта изготовления бетонной смеси и квалифицированной лаборатории строительных материалов для точного подбора состава. Удобство изготовления образцов большого диаметра (60 мм).

Недостатками являются в первую очередь наличие пустот в связи с практической сложностью качественно уплотнить бетонную смесь (рис. 8). Необходима достаточная квалификация в изготовлении бетонной смеси и наличии лабораторных условий для подбора требуемого состава. Сложность изъятия образцов из пластиковых труб, особенно при малых диаметрах, что вызывает сколы образца. Длительное время набора прочности бетоном. Небольшое отличие от бетонов в реальных конструкциях.



Рис. 8. Фото бетонного образца в пластиковой трубе и с дефектами

Для оптимизации данного метода лучше всего обратиться в строительные лаборатории, которые максимально качественно изготовят крупную партию образцов. Данный метод изготовления лучше применять для образцов большого диаметра (60 мм).

Изготовление образцов с помощью буровой установки Hilti DD 130

Как говорилось ранее, данная буровая установка может быть использована как для бурения кернов из готовых бетонных конструкций, так и для бурения в лабораторных условиях небольших бетонных изделий. Полученные керны впоследствии нарезаются на готовые образцы для динамических испытаний. Остановимся более подробно на работе с буровой установкой в лабораторных условиях. В нашем случае для изготовления образцов использовалась брусчатка из мелкозернистого бетона марки В22,5, предоставленная ООО «ЗКПД-70». Перед началом бурения с целью закрепления брусчатки и буровой установки необходимо создать специальную металлическую площадку. Площадка должна состоять из двух уровней, с разницей по высоте в 30-50 см (в зависимости от максимального размера бетонного изделия + 15 см).

На верхнем уровне выверяется и закрепляется буровая установка, а на нижнем крепятся тиски или зажимы для жесткой фиксации брусчатки. Бурение лучше осуществлять в мокром режиме либо с подачей воды автоматически (дополнительная установка Hilti), либо в ручном режиме. Для бурения использовалась коронка Hilti с внутренним диаметром чуть менее 20 мм (рис. 9).



Рис. 9. Закрепление буровой установки и брусчатки

Во избежание застревания образца, буровую коронку нужно тщательно смазать изнутри машинным маслом. После получения кернов их необходимо нарезать на готовые образцы нужной длины. Для этого керны закрепляются на кам нерезном станке с помощью струбцин. Именно на этом этапе возникают основные сложности. В данном методе были испробованы три способа закрепления. Первый – закрепление чистого керна струбцинами. Второй – установка керна в пластиковую трубу такого же диаметра с последующим закреплением струбцинами. И третий – установка керна в две пластиковые трубы с зазором для прохождения диска пилы, с закреплением труб струбцинами (рис. 10).

При всех трех способах закрепления во время распила возникает существенный дефект – откол части образца в последние секунды прохождения пилы. Пластиковые трубы в данном случае выполняют роль обоймы, снижающей величину скола. Однако, даже если пилу вести максимально медленно – откол небольшой величины практически неизбежен. Это связано с небольшим диаметром образца (19 мм) и с мелкой фракцией заполнителя, а также с большой толщиной диска. При распиле образца в пластиковой трубе часть трубы «затягивает» диском пилы, что создает напряжения в кромке бетонного образца и происходит небольшое разрушение. Когда образец находится между двух разделенных труб с зазором для прохождения пилы, скол становится минимальным. Следовательно, для окончательной оптимизации данного метода при распиле образцов малого диаметра необходимо применять диск небольшой толщины или оборудовать распил с помощью угловой шлифовальной машины (болгарки). Важно отметить, что при распиле каждого образца необходимо каждый раз сдвигать и заново закреплять керн или пластиковые трубы, что увеличивает время изготовления образцов.

Достоинствами данного метода является использование алмазных буровых коронок высокого качества и большой длины для получения прямолинейных цилиндрических кернов. Применение вышеописанной установки дает высокую скорость бурения, что особенно важно при получении образцов большого диаметра (60–100 мм). Так же немаловажным является возможность получать образцы из существующих конструкций с целью их обследования на динамические свойства.



Рис. 10. Закрепление кернов на камнерезном станке

К недостаткам можно отнести сложность работы с кернами малого диаметра (20 мм) и большое количество промежуточных операций.

Высверливание образцов из бетонных пластин алмазными коронками малой длины

Как показала практика, наиболее простым и мало затратным является метод высверливания образцов из заранее напиленных бетонных пластин нужной толщины. На первом этапе брусчатка из мелкозернистого бетона марки B22,5, закрепленная струбцинами на камнерезном станке, нарезается на пластины нужной толщины. Далее пластины крепятся на сверлильном станке и с помощью алмазной коронки на низких оборотах высверливается бетонный образец с подачей воды в ручном режиме (рис. 11, 12). В нашем случае вода подавалась с помощью медицинского шприца объемом 12 мл. Это необходимо для охлаждения коронки с целью продления срока ее службы.



Рис. 11. Заготовка бетонных пластин



Рис.12. Высверливание образцов

В процессе сверления последние 1–2 мм толщины пластины являются самыми важными. На этом участке, во избежание сколов сила давления коронки должна быть минимальной. Однако, даже при аккуратном прохождении последних миллиметров, количество образцов, имеющих сколы, составляет приблизительно 25 %. Для оптимизации данного метода были испробованы следующие модификации. Вместо нарезки на пластины, брусчатка по всей площади одной из сторон просверливается алмазной коронкой на требуемую глубину, равную толщине образца +2 мм. После этого с помощью струбцин брусчатка крепится на камнерезном станке, и образцы срезаются пилой. В этом случае возникает обратная проблема. Образцы откалываются раньше, чем пила доходит до их края, и вместо скола остается «зуб», который впоследствии можно сточить (рис. 13).



Рис. 13. Образец с дефектом «зуба»

Важно учесть, что при этой модификации увеличиваются трудозатраты каждого образца и при стачивании «зуба» необходимо точно попасть в плоскость поверхности образца.

Вторая оптимизация предполагает применение подложки, в виде заранее просверленной бетонной пластины той же алмазной коронкой (рис. 14).



Рис. 14. Подложка с просверленным отверстием

Отверстие в пластине центрируется относительно алмазной коронки, а сверху крепится заготовленная бетонная пластина. При сверлении в последние миллиметры образец продавливается в отверстие, так как диаметр отверстия больше диаметра образца. В этом случае у образца остается небольшая «корона» по радиусу верхней грани, толщиной примерно 1 мм. Данная «корона» может быть сточена или оставлена, так как она мало влияет на результаты эксперимента.

Достоинствами этого метода является более быстрое и простое изготовление образцов нужной толщины, невысокая стоимость алмазных коронок, а также возможность простой оптимизации. К недостаткам можно отнести наличие сколов на окончательном этапе сверления, невысокая скорость, ограниченная свойствами алмазной коронки.

В качестве дополнительной оптимизации, ускоряющей процесс изготовления образцов, на сверлильном станке можно закрепить не одну пластину, а несколько (3–4). При этом между пластинами можно расположить материалы, увеличивающие плотность их прилегания, что снизит эффект пробивания коронки на последних миллиметрах. После прохождения каждой пластины, образец необходимо удалить из коронки, так как она имеет небольшую длину.

Изготовление образов для теста на скалывание

При испытаниях на скалывание испытываемый образец должен иметь длину значительно больше поперечного размера. Такие образцы можно изготовить посредством буровой установки, с использованием алмазных коронок большой длины. Однако гораздо проще изготовить образец с квадратным сечением, с помощью кам нерезного станка. К примеру, брусчатка нарезается на пластины, после чего пластины нарезаются на готовые образцы.

Сечение бетонного образца на скалывание не должно выходит за сечение мерных стержней. Следовательно, размеры сечения должны соответствовать размерам квадрата, вписанного в размер окружности мерных стержней.

Результаты пробной серии динамических испытаний

Ниже представлена полученная диаграмма испытаний пробной серии бетонных образцов с использованием установки для динамических испытаний по методу Кольского. Перед началом испытаний образцы измеряются и пронумеровываются (рис. 15).



Рис. 15. Подготовка образцов к испытаниям

На рис. 16, 17 Представлена проверка выполнения основной предпосылки метода Кольского об однородности НДС в образце:

$$E_i + E_r = E_t, \tag{1}$$

где, E_i — падающий импульс, E_r — отраженный от образца, E_t — прошедший через образец импульс.

Таким образом из рисунка видно, что предположение о равенстве сил на торцах выполняется в данном случае.



Из рис. 18 видно, что начальные участки полученных диаграмм имеют линейный характер. Спадающая ветвь диаграммы деформирования и осмотр образца свидетельствует о том, что образец в процессе эксперимента разрушился. В качестве прочности можно взять величину порядка 90 МПа при скоростях 505 с⁻¹ и 85 МПа при скоростях 146 с⁻¹.



Рис. 18. Диаграмма деформирования при двух различных скоростях деформации

Заключение

В данной статье представлены разные методы изготовления бетонных образцов для динамических испытаний по методу Кольского. Рассмотрены требования, предъявляемые к образцам, а также используемые инструментальные установки. В заключении можно сделать следующие выводы:

1. К качеству бетонных образцов для динамических испытаний предъявляется ряд высоких требований: геометрическая точность, гладкость поверхностей, однородность. Образцы диаметром до 60 мм желательно изготавливать из мелкозернистого бетона, с фракцией заполнителя 1–5 мм с целью снижения масштабного эффекта.

2. Для подготовки образцов необходим ряд инструментальных установок, таких как камнерезный станок, буровая установка, сверлильный станок, алмазные коронки, струбцины и измерительные инструменты.

3. Отливка бетонной смесью применима в основном для образцов большого диаметра (50–100 мм). Главным недостатком этого способа изготовления образцов является наличие пустот и некоторые отличия от реальных бетонных конструкций.

4. Изготовление образцов с помощью буровой установки оправдано при необходимости получения образцов из существующих бетонных конструкций, а также при изготовлении образцов большого диаметра (40–100 мм) за счет использования высококачественных алмазных коронок большой длины и различных диаметров.

5. Высверливание образцов из бетонных пластин алмазными коронками оптимально подходит при изготовлении образцов малого диаметра (20 мм) в связи с простотой и достаточно высокой скоростью данного метода.

6. Образцы для испытаний на скалывание проще изготавливать в виде длинных призм.

7. Результаты пробной серии экспериментов показывают, что полученные образцы пригодны для проведения динамических испытаний по методу Кольского.

Таким образом, выбор метода изготовления бетонных образцов зависит от предъявляемых требований, наличия необходимых инструментальных установок, диаметра мерных стержней и вида испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по Соглашению №14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEF157817X0246).

Литература

1. Брагов А. М. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы: монография / А. М. Брагов, А. К. Ломунов. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017.

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА АНИЗОТРОПНОМ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОМ ЭФФЕКТЕ ДЛЯ ДАТЧИКОВ УГЛА ПОВОРОТА

С. В. Горохов, А. В. Негин, В. Е. Сергеев

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В настоящей работе показаны результаты разработки топологии и технологии изготовления магниторезистивных преобразователей (МРП) для датчиков угла поворота. Выходные электрофизические характеристики МРП аналогичны датчику KMZ – 43 Т фирмы Philips.

Ключевые слова: магниторезистивный преобразователь, датчики угла поворота, мост Уинстона, анизотропный магниторезистивный эффект.

Датчики магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезистивных структур занимают большой объем на рынке микроэлектроники, благодаря таким их свойствам как: энергонезависимость, широкий температурный диапазон, радиационная стойкость, отсутствие механического контакта, высокая надежность, низкий порог чувствительности и многим другим [1]. Требования к современным системам управления постоянно ужесточаются и соответственно повышаются требования к разрешающей способности датчика угла поворота. Поэтому необходимо постоянно разрабатывать новые конструкторские и технологические решения.

Основная цель работы — разработка конструкции и технологии изготовления МРП на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (AMP) для датчика угла поворота с минимальным эффектом размагничивающих полей и возможностью устранения технологического разбаланса моста Уинстона.

АМР эффект проявляется в том, что сопротивление тонкой ферромагнитной пленки, измеренное вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН), оказывается несколько выше сопротивления пленки вдоль оси трудного намагничивания (ОТН). Величина АМР эффекта при комнатной температуре составляет 1,5-2,5 % в зависимости от материала магниторезистивного слоя [1, 2]. Характеристики МРП на основе АМР эффекта позволяют использовать их для решения таких задач как: бесконтактное измерение тока в электрических цепях, скоростей вращения и углов поворота подвижных деталей механизмов, магнитных полей в лиапазоне от елинии нТл ло сотен мкТл. Формирование МРП производится на основе магниторезистивных пленок с наведенной анизотропией. Анизотропии в тонких пленках добиваются посредством напыления пленок из сплавов с содержанием Fe, Ni и Co во внешнем магнитном поле.

АМР эффект имеет угловую зависимость, что используется для создания датчиков определения углового положения. Угловые измерения представляют собой измерение выходных напряжений с мостов Уинстона засчет изменения внутреннего намагничивания магниторезистивных полосок от воздействия внешнего магнитного поля, такого чтоб направление обоих векторов стало одинаковым. При этом внешнее поле должно быть много больше чем внутреннее намагничивание магниторезистивных полосок. Следовательно, угловые МРП работают в режиме насыщения. При измерении углов поворота используют схему установки датчика, изображенную на рис. 1 [3]. На деталь 3, угол поворота которой требуется измерять, устанавливается постоянный магнит 2. Магнит вращается перед датчиком 1, причем внутренний вектор магнита должен быть параллелен внутреннему вектору намагничивания датчика в контрольной точке, выбранной за нулевое положение. Выходная характеристика моста Уинстона будет соответствовать функции синуса двойного угла что позволяет определять углы в диапазоне от 0° до 90°. Для определения углов от 0° до 180° используют два моста сдвинутые друг относительно друга на 45°. Выходное напряжение мостов Уинстона будут соответствовать функциям sin 2α , cos 2α , cooтветственно.



Рис. 1. Схема установки датчика углового положения: 1 – угловой магниторезистивный датчик; 2 – постоянный магнит; 3 – вращающаяся деталь механизма

Обработка выходных сигналов двух мостов позволяет получить линейную функцию зависимости сигнала от угла поворота по формуле 1:

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U_{a,\sin}}{U_{a,\cos}}\right),\tag{1}$$

где $U_{a,sin}$ и $U_{a,cos}$ выходные сигналы двух мостов.

Схематическое изображение стандартной топологии углового МРП показано на рис. 2. Цифрами 1 и 2 обозначены измерительные мосты двухмостовой схемы. Передаточная характеристика такого МРП изображена на рис. 3 [4, 5, 6].



Рис. 2. Топология углового МРП с двухмостовой схемой



Рис. 3. Передаточная характеристика углового МРП с двухмостовой схемой: 1 – мост 0°, 2 – мост 45°

Для наличия «полезного» выходного сигнала с моста Уинстона от воздействия внешнего магнитного поля, необходимо создать смещение тока в магниторезистивных полосках относительно ОЛН. Существует две схемы, при которых создается смещение на 45°, это полюса барбера (ПБ) и наклонное расположение магниторезистивных полосок (рис. 4).



Рис. 4. Способы задания смещения тока: а – наклонные магниторезистивные полоски; б – полюса барбера

В преобразователях с наклонными полосками смещение получается посредством расположения магниторезистивных полосок под углами 0°, 45° и 90°. В структуре с применением ПБ смещение тока получается в нанесении проводников с малым сопротивлением (Al, Ag, Cu) под углом 45° градусов относительно направления магниторезистивных полосок. Схема прохождения тока через барбер – полюсную структуру изображена на рис. 5.



Рис. 5. Прохождение тока через барбер – полюсную структуру

При любом способе смещения тока в магниторезистивных полосках, воздействие магнитного поля будет вызывать уменьшение сопротивления одной пары плеч моста Уинстона и увеличение сопротивления в другой паре, что послужит появлению «полезного» выходного сигнала.

Как было описано выше, угловые МРП имеют особенность – работа в состоянии насыщения. Однако, размагничивающее поле, для короткой стороны магниторезистивной полоски, на порядок больше чем для длинной стороны. Это приводит к разнице в сопротивлении плеч моста и, следовательно, к увеличению разбаланса. Физический смысл размагничивающих полей состоит в том, что во внешнем магнитном поле на краях ферромагнитного образца образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное поле обратного (по отношению к внешнему полю) направления. Размагничивающее поле пропорционально намагниченности.

В данной работе показана разработка новой топологии МРП с минимальным эффектом размагничивающих полей. Основой МРП являлось два измерительных моста Уинстона смещенных друг относительно друга на 45°. Обеспечение четной характеристики выходного сигнала определяется созданием ПБ на магниторезистивных полосках. Целесообразность применения данной структуры заключалось в том, что все магниторезистивные полоски в мосте Уинстона расположены одинаково по отношению к ОЛН (0° и 45°). По этому принципу в данной работе были разработаны два типа МРП (рис. 6), первого типа с различной длинной магниторезистивных полосок (рис. 6а) и второго типа с одинаковой длиной магниторезистивных полосок (рис. 6б). Так же в данных топологиях обеспечена возможность коррекции технологического разбаланса мостов посредством лазерного выжигания части подгоночных сопротивлений выделенных на рисунках темным контуром [7].

На основе проведенных исследований выбрана структура для изготовления МРП - сплав FeNiCo. За один цикл откачки рабочей камеры, установки электронно – лучевого напыления «Оратория – 9М» с безмасляной системой откачки путем последовательного вакуумного напыления на подложку, напыляют структуру FeNiCo – Ta – Cu – FeNiCo, из которой, путем фотолитографического травления через совмещенный фотошаблон, сначала формируют контур моста Уинстона с рисунком проводящего слоя, включающим полоски, перемычки, проводники и контактные площадки, а затем, через другой фотошаблон, магниторезистивные полоски и ПБ с образованием топологии моста Уинстона [8].

Функциональное назначение слоев следующее:

– первый слой FeNiCo – магниточувствительный слой; второй слой Та – защитный слой, с большим удельным поверхностным сопротивлением (он практически не вносит вклада в сопротивление моста);

– третий слой Cu – проводящий слой, служащий для формирования электрической разводки, перемычек, ПБ и контактных площадок;

– четвертый слой FeNiCo – защищает медь от окисления.

В работе были определены режимы напыления и фотолитографического травления структуры с использованием фоторезиста micropositS1813SP15. Точность изготовления ширины элементов составила: для магниторезистивных полосок шириной 40 мкм не более 1,5 мкм, а для ПБ шириной 24 мкм не более 1 мкм.

Для снятия выходных напряжений с МРП использовался стенд включающий в себя: пульт управления, соленоид с 2000 витками создающий напряженность магнитного поля порядка 12 мТл, контактное приспособление для подачи напряжения и снятия выходных напряжений и 2 источника питания.

На рис. 7 представлены выходные напряжения МРП топологии первого типа (выходные напряжения МРП второго типа аналогичны) и графики функций sin(2x) и cos(2x) умноженные на амплитуду выходного сигнала.

Из рис. 7 видно, что угловые выходные характеристики мостов Уинстона МРП существенно не отличаются от расчетных функций sin и соз двойного угла. Выходная характеристика МРП соответствует заявленным параметрам датчика КМZ – 43T, что позволяет использовать его в датчиках угла поворота в качестве первичного преобразователя магнитного поля.



Рис. 6. Эскиз топологии угловых МРП: а – топология первого типа, б – топология второго типа



Рис. 7. Выходная характеристика двух измерительных мостов Уинстона в МРП с топологией первого типа (рис. 6а) в сравнении с функциями sin(2x) и cos(2x)

Заключение

1. Разработаны две конструкции МРП для датчика угла поворота. Для данного типа МРП применена полюс — барберная структура для смещения тока в магниторезистивных полосках с целью получения минимального эффекта размагничивающих полей.

2. Разработаны МРП с угловой зависимостью по характеристике аналогичной датчику KMZ – 43T фирмы Philips. В МРП предусмотрена возможность коррекции разбаланса мостов Уинстона за счет технологической операции лазерной подгонки сопротивлений плеч моста.

3. МРП позволяют использовать их в датчиках угла поворота в качестве первичного преобразователя магнитного поля.

Литература

1. Борисов А. Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 56–60. 2. Амеличев В. В., Гамарц И. А., Касаткин С. И. и др. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано – и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 22–24.

3. Сысоева С. Автомобильные датчики положения, современные технология и новые перспективы // Компоненты и технологии. 2005. № 4. С. 52–62.

4. Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В. и др. Анизотропные магниторезистивные датчики магнитного поля и тока // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С. 141–152.

5. Ширяев Ю. Три кита бесконтактных датчиков положения Honeywell S&C: магнитное поле, инфракрасный свет и ультразвук // Компоненты и технологии. 2011. № 1. С. 13–16.

6. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы // М.: Высшая школа, 1976.

7. Патент 2664868 РФ, H01L43/08. Способ балансировки магниторезистивного датчика // А. В. Негин, В. К. Гусев // Бюл. № 24, 2018.

8. Патент 2617454 РФ, H01L43/12. Способ изготовления магниторезистивного датчика // В. К. Гусев, А. В. Негин, Т. Г. Андреева, С. В. Горохов // Бюл. № 12, 2017.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ZEMAX И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В. Г. Каменев, <u>Н. А. Каменева</u>

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В докладе описывается система для регистрации цифровых голограмм, основанная на использовании телецентрической оптики. Предложена оригинальная схема, основанная на использовании двух телецентрических подсистем. Приводятся результаты исследования характеристик оптической системы с телецентрическим ходом лучей, предназначенной для регистрации цифровых голограмм. Результаты моделирования в среде проектирования Zemax предложенной системы и ее экспериментальная отработка подтверждают требуемые характеристики.

Введение

В научной среде активно изучается поведение твердых тел при ударно-волновом нагружении. Однако под воздействием мощных ударных волн в материале развиваются гидродинамические неустойчивости, и происходит дробление материала с образованием дисперсной фазы. Такой процесс называется эффектом пыления. Скорость движения частиц дисперсной фазы превышает скорость движения свободной поверхности, а плотность частиц может достигать величины, достаточной для полного экранирования свободной поверхности от зондирующего оптического излучения. Таким образом, данный эффект существенно ограничивает возможности исследования ударно-волнового нагружения вещества, а в ряде случаев приводит к повреждению регистрирующей аппаратуры. Для поиска возможностей нейтрализации негативных последствий пыления необходимо детальное понимание физических механизмов, стоящих за этим явлением. Для достижения этой цели необходимым условием является наличие высокоточных методов и аппаратуры, позволяющих регистрировать параметры дисперсной фазы во взрывных экспериментах.

Одним из методов регистрации пыления является цифровая динамическая голография. В данном методе исследуемый объект подсвечивается коротким лазерным импульсом (менее 10 нс), и с помощью цифровой матрицы регистрируются амплитуда и фаза рассеянного излучения в виде интерференционной картины. Цифровая обработка регистрируемого изображения с помощью вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа позволяет получить информацию о трехмерном расположении микроскопических объектов в пределах зондированного объема. Поскольку данные явления регистрируются во взрывных опытах, существует необходимость отделения и удаления зондируемого объема от регистрирующей аппаратуры. Голографическая картина переносится на цифровую матрицу с помощью оптики. При этом качество и информативность зарегистрированной голограммы напрямую зависит от качества оптической системы, осуществляющей данный перенос.

Требования к голографической системе регистрации и схема макета

При регистрации голограмм быстропротекающих процессов необходимо осуществлять оптический перенос голограммы на удаленный регистратор, защищенный от взрывного воздействия. Оптическая система должна обеспечивать перенос голограммы без искажения пропорций и с одинаковым оптическим увеличением в пределах глубины регистрируемой области. Данный эффект обеспечивается в телецентрических системах, где главные лучи идут параллельно оптической оси, а искажения, связанные с перспективой, отсутствуют. Следовательно, первым требованием при разработке голографической установки является обеспечение телецентрического эффекта при переносе голограммы.

При любых значениях фокусного расстояния изображения объектов, находящихся на различных расстояниях от линзы, будут строиться с разными увеличениями (эффект перспективы). Следовательно, одиночная линза обеспечить телецентрический эффект не может. Поэтому телецентрические системы содержат два компонента: телепозитив (фокусирующий компонент, формирующий изображение) и теленегатив (компонент, компенсирующий перспективу). Два данных компонента располагаются так, чтобы задний фокус телепозитива был совмещен с передним фокусом теленегатива.

С помощью основных формул геометрической оптики можно получить следующее соотношение:

$$\Gamma = \frac{F_2}{F_1},\tag{1}$$

где Γ – линейное увеличение; F_1 – фокусное расстояние одного компонента, F_2 – фокусное расстояние второго компонента.

Таким образом, увеличение телецентрической системы не зависит от расстояния до объекта, а зависит только от отношения фокусов двух ее компонентов. Следовательно, для обеспечения необходимого оптического увеличения нужно подбирать компоненты с соответствующим отношением фокусов.

Восстановление голограммы производится с помощью математической обработки зарегистрированной интерференционной картины. Моделируя интерференцию опорной волны на голограмме, можно восстановить исходное изображение. Таким образом, восстанавливается трехмерная сцена того, как эти частицы располагались во время их съемки. Качество восстановления изображения зависит от качества регистрации голограммы. Ограничение разрешения оптической системы приводит к тому, что низкоконтрастная часть интерференционных колец может быть не зарегистрирована, что отрицательно скажется на контрасте восстановленного изображения. Отсюда вытекает второе требование к разрабатываемой установке – обеспечение высокого разрешения и учет его влияния на регистрируемые голограммы.

Разрешение голографических фотопластинок составляет более 1,5 тысячи штр/мм, что соответствует разрешению объектов до 330 нм. Для регистрации таких объектов на чувствительную ПЗС-матрицу с размером пикселов 6 мкм необходимо обеспечить оптическое увеличение примерно в 10–20 раз.

Третье важное требование вытекает из необходимости переноса голограммы из области взрывного воздействия. Использование мощных зарядов, необходимых для полноценных исследований экстремальных состояний вещества, требует наличия в системе уничтожаемого узла, располагаемого в пределах взрывозащитной камеры, и сохраняемого узла, расположенного за защитным бронестеклом. Поэтому необходимо обеспечить перенос голограммы при расстоянии между уничтожаемой и сохраняемой частью системы от 2,5 до 5–6 метров.

Вариант макета системы регистрации цифровых голограмм (рис. 1) состоит из двух телецентрических подсистем, одна из которых состоит из относительно недорогих микрообъектива и телеобъектива,



Рис. 1. Устройство регистрации цифровых голограмм (макет): 1 – лазер, 2 – телескоп, 3 – зеркало, 4 – объект, 5 – микрообъектив, 6 – телеобъектив, 7 – длиннофокусный телеобъектив, 8 – корректирующая линза, 9 – цифровая матрица

расположенных вблизи исследуемого объекта. Она формирует промежуточное изображение, увеличенное примерно в 20 раз. Вторая телецентрическая подсистема состоит из длиннофокусного объектива и корректирующей линзы. Она переносит удаленную голограмму в область регистрации в масштабе 1:2.

Моделирование оптического тракта предлагаемой системы в среде проектирования Zemax

Для анализа телецентричесого эффекта в среде проектирования Zemax была создана сборка точечных источников света, представляющая собой кубическую решетку. Шаг решетки составляет 100 мкм, а сборка в целом представляет собой куб, содержащий 3×3×3 источника.

Было решено использовать в качестве моделей объективов линзы с эквивалентным фокусным расстоянием. В процессе проектирования было обнаружено, что сферические аберрации данных линз создают заметные искажения пучков. Для уменьшения их влияния на модель в качестве линз были использованы дуплеты из стекол ВК7 и SF3 с компенсацией сферической аберрации. Поскольку в реальной схеме используется монохроматическое лазерное излучение, то влияние хроматических аберраций в рамках данной модели не рассматривалось.

Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем подсистемы увеличения и подсистемы переноса. В подсистеме увеличения телепозитив и теленегатив моделировались с помощью линзовых дуплетов. Телепозитив представляет собой склейку из двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 20 мм и диаметром апертуры 20 мм из стекла ВК7 и вогнутовыпуклой линзы с радиусом вогнутой поверхности 20 мм, радиусом выпуклой поверхности 40 мм и сделанной из стекла SF3. Теленегатив – склейка из двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 400 мм и диаметром апертуры 20 мм из стекла ВК7 и вогнуто-выпуклой линзы с радиусом вогнутой поверхности 400 мм, радиусом выпуклой поверхности 860 мм из стекла SF3.

Промежуточное изображение формировалось в интервале расстояний 190-268 мм от теленегатива системы увеличения. По сравнению с исходным источником света происходило сильное растяжение изображения вдоль оптической оси. По сравнению с размерами в плоскостях, ортогональных оптической оси, происходило искажение пропорции в 39 раз. Данный эффект достаточно характерен для телецентрических систем. В частности, о наличии сильного растягивания вдоль оптической оси голограмм процессов пыления сообщает группа Соренсона в работе [1]. Также следует отметить, что порядок расположения слоев в промежуточном изображении оказывается «вывернутым на изнанку» – плоскости, находящиеся ближе к системе увеличения, переносятся дальше, и наоборот.

Телепозитив в подсистеме переноса представляет собой телескоп-рефлектор со снятым окуляром и с фокусом вогнутого зеркала 1200 мм и апертурой 250 мм. Поскольку излучение в данный телескоп вводилось со смещением от оси вогнутого зеркала (прямо на оси расположено поворотное зеркало, выводящее излучение из трубы телескопа), то данная конструкция не заменялась эквивалентной линзой, а моделировалась целиком. Теленегатив подсистемы переноса моделировался с помощью тонкой длиннофокусной двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 620 мм и расположенной так, чтобы ее оптическая ось с учетом отражения на поверхностях двух зеркал совпала с осью телепозитива. При этом расположении аберрации сферического зеркала и линзы частично компенсируют друг друга.

Конечное изображение формировалось на расстоянии 137,75–158,75 мм от теленегатива системы переноса. По сравнению с промежуточным изображением оно было сжато в 4 раза вдоль оптической оси. Таким образом, эффект растяжения вдоль оптической оси частично компенсировался.

Для промежуточного и конечного изображения была также рассчитана функция рассеяния точки (ФРТ). На рис. 2а приведена ФРТ для промежуточного изображения. Ширина на полувысоте для полученного пика составляет около 300 нм — величину, меньшей длины волны излучения (532 нм). Следовательно, увеличивающая система в данной модели является дифракционно ограниченной. На рис. 2б показана ФРТ для конечного изображения. В данном случае наблюдается астигматизм, приводящий к растягиванию пятна рассеяния в вертикальном направлении. При этом ширина на полувысоте в горизонтальном направлении – 300 нм, и здесь разрешение ограничивается дифракцией. В вертикальном направлении ширина на полувысоте составляет около 2 мкм. Наиболее вероятная причина астигматизма – влияние вогнутого сферического зеркала, на которое лучи падают не по центру, а параллельно оптической оси со смещением на расстоянии порядка половины радиуса апертуры.

Область источника излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора размером 4×4 мм и разрешением 500×500 пикселей. Были зафиксированы координаты вдоль оптической оси, при которых происходила фокусировка изображений точечных источников. На рис. 3 приведены полученные изображения в одном масштабе. Можно отметить, что на данных изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения. Изображения переносятся линейно и без видимых искажений.

На рис. 4 координаты точек исходного объекта (рис. 4а), промежуточного (рис. 4б) и окончательного (рис. 4в) изображений приведены в трехмерном координатном объеме. Наглядно видно, что обеспечивается телецентрический эффект, а слои источников, расположенные на различном расстоянии, переносятся с одинаковым увеличением.



Рис. 2. ФРТ (цена деления по x и y – 0,02 мкм, z – усл. ед.): а – для промежуточного изображения, б – для конечного изображения



Рис. 3. Полученные изображения источников света в одном масштабе



Рис. 4. Координаты точек объекта в трехмерном координатном объеме: а – исходный объект, б – промежуточное изображение, в – окончательное изображение

Эксперименты

В первой серии экспериментов контролировалось обеспечение телецентрического эффекта. На рис. 5 представлены изображения миры, полученные при смещении ее вдоль оптической оси. На первом кадре мира находится в объектной плоскости, на втором она смещена на 3 мм, на третьем – на 6 мм. При смещении миры происходит потеря резкости, однако размер изображения остается тем же. Таким образом, достигается телецентрический эффект.



Рис. 5. Полученные изображения миры в зависимости от места ее расположения на оптической оси

Для оценки способности оптической системы передавать тонкую структуру интерференции необходимо иметь данные о частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) исследуемой системы. Вторая серия экспериментальных исследований была посвящена анализу ЧКХ системы.

Исследование проводилось следующим образом: ПЗС-матрицей регистрировалась каждая позиция миры ГОИ № 1, затем в программе ImageJ обрабатывался каждый кадр. Изображения нормировались для устранения фоновой яркости. По формуле

$$T = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$
(2)

рассчитывалась ЧКХ для каждой отдельной позиции миры. Затем все сводилось в один график. На рис. 6 представлен график ЧКХ устройства. С помощью Фурье-преобразования из ЧКХ рассчитывалась ФРТ для оптической системы. Она приведена на рис. 7.



Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика



Рис. 7. Функция рассеяния точки

С одной стороны, динамический диапазон системы позволяет регистрировать объекты с контрастом до 0,025. Следовательно, разрешения системы достаточно для передачи интерференционной структуры. С другой стороны, по графику ЧКХ видно, что пространственные частоты в интервале 150–200 штр./мм передаются со слабым контрастом (менее 0,1). Это позволяет предположить, что периферийные интерференционные кольца, обладающие малой толщиной и яркостью, могут быть не зарегистрированы в голографическом изображении. Последующая обработка голограммы шаблоном, включающим эти кольца, приведет к дополнительному зашумлению восстановленного изображения.

Для улучшения качества регистрации голограмм можно наметить два направления: первое – повышение контраста регистрации высоких пространственных частот, второе – уточнение пределов разрешения и корректировка восстановительного шаблона с целью улучшения соотношения сигнал/шум в восстанавливаемых изображениях.

Выводы

1. Предложен вариант схемы телецентрической системы для оптической голографии, содержащий две телецентрические подсистемы – подсистему увеличения и подсистему переноса.

2. Результаты моделирования в среде Zemax телецентрической системы показывают, что предлагаемый вариант системы удовлетворяет требованиям к разрабатываемому устройству – обеспечивается телецентрический эффект, оптическое увеличение и перенос изображения.

3. В системе переноса наблюдается незначительный астигматизм, исправление которого – одно из направлений оптимизации разрабатываемой системы.

 Взаимодействие подсистемы увеличения и подсистемы переноса позволяет частично компенсировать растяжение вдоль оптической оси.

5. Экспериментально показано обеспечение телецентрического эффекта при переносе голограммы в зону регистрации.

6. Экспериментально исследована ЧКХ системы, получен расчетный профиль ФРТ, показаны ограничения разрешающей способности при регистрации голограмм.

Литература

1. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography / Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., et al. // LA-UR-14-24722 2014-06-25 (URL: http:// permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-14-24722).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ АМОРФНОГО БОРА МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АДСОРБЦИИ АЗОТА

<u>И. Ф. Кашафдинов</u>, А. В. Соломонов, М. В. Царёв, Е. В. Забавин, И. А. Царёва, О. Ю. Юнчина, П. Л. Киселев, С. А. Пичугина

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

Введение

Порошок аморфного бора является важным компонентом порошковых систем, применяемых в различных отраслях промышленности: для синтеза жароупорных боридов; в металлургии для получения аморфных сталей; в производстве постоянных магнитов высокого качества; в полупроводниковой технике; в ядерной энергетике для биозащиты; в производстве электродов для сварки металлов; в производстве пиротехнических составов (см., напр., [1]). До настоящего времени на предприятиях РФ контроль значений удельной поверхности (S_{v∂}) порошка аморфного бора ТУ 1-92-154-90 проводят на приборе Дерягина по сопротивлению навески прессованного порошка течению разреженного воздуха. В зависимости от марки порошка (Б-99А или Б-99Б) его удельная поверхность должна составлять от 10 до 20 ${\rm m}^2/{\rm r}$.

К настоящему времени выпуск прибора Дерягина в РФ прекращен. В соответствии с этим проведение настоящей работы обусловлено необходимостью совершенствования подходов к определению удельной поверхности аморфного бора на различных предприятиях РФ, а также к унификации приборной базы для проведения таких измерений. В данной работе для выполнения поставленной цели предлагается использовать анализатор удельной поверхности российского производства «Сорбтометр-М002», позволяющий определять удельную поверхность исследуемых материалов по методу БЭТ. Данный прибор разработан специалистами Института катализа им. Н. И. Борескова СО РАН, и серийно изготавливается и поставляется ЗАО «Катакон» (г. Новосибирск).

Задачей настоящей работы являлось обоснование целесообразности использования анализатора «Сорбтометр-М002» для определения удельной поверхности аморфного бора методом низкотемпературной адсорбции азота, а также разработка методики проведения таких измерений с рассмотрением возможности ее последующего использования на предприятиях РФ.

Метод измерений

Измерение удельной поверхности методом низкотемпературной адсорбции основано на измерении количества газа-адсорбата, сорбируемого на поверхности исследуемого порошкового или дисперсного материала при пониженной температуре. В случае применения анализатора «Сорбтометр-М002» в качестве газа-носителя, непрерывно продуваемого через измерительный блок адсорбера, используется гелий марки А (или Б), а в качестве газа-адсорбата, дозировано подаваемого на образец в составе рабочей газовой смеси, используется азот ОСЧ.

Принцип действия анализатора базируется на динамическом (термодесорбционном) методе, который заключается в измерении объема адсорбированного газа (газа-адсорбата), находящегося в условиях сорбционного равновесия в контакте с дисперсным пористым материалом. Результаты измерений объема адсорбированного газа используются для расчета удельной поверхности на основе уравнения Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) [2]:

$$\frac{1}{a(P_0/P-1)} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C-1}{a_m C} P/P_0, \qquad (1)$$

где a – равновесное значение адсорбции при относительном давлении P/P_0 ; P – равновесное давление; P_0 – давление насыщенного пара газа-адсорбата при температуре жидкого азота; a_m – адсорбционная емкость монослоя; C – константа, зависящая от теплоты адсорбции.

Из сорбционных данных может быть определена величина удельной поверхности образца:

$$S_{\rm va} = a_m \omega N_A, \tag{2}$$

где ω – средняя площадь, занимаемая молекулой адсорбата в заполненном монослое (для молекулы азота $\omega = 0,162 \text{ нм}^2$); N_A – число Авогадро.

Описание анализатора «Сорбтометр-М002»

«Сорбтометр-М002» – это компактный автоматизированный прибор, внесенный в Государственный реестр средств измерений РФ (Рег. № 55098-13), который может эффективно использоваться для надежного и оперативного контроля качества продукции при минимальном участии технического персонала. Анализатор представляет собой моноблок, в состав которого входят следующие основные узлы (см. рис. 1): измерительный блок адсорбера, станция подготовки образцов к измерениям, система автоматической доливки жидкого азота при длительной работе, система задания скорости расхода газов, блок детектирования, система электронного управления. Прибор полностью управляется компьютером. Интерфейс программы управления обеспечивает простоту работы с прибором, контроль текущего хода измерений, выбор метода обработки результатов экспериментов в соответствии с одним из заложенных в него алгоритмов и хранение полученных результатов в базе данных.

Технологическая схема измерительной части анализатора приведена на рис. 2. Последовательность операций при проведении измерений следующая. Пробу исследуемого образца загружают в ампулу, которую закрепляют в держателе, и помещают в адсорбер. Через исследуемый образец при температуре жидкого азота пропускают стационарный поток смеси газа-носителя (гелия) и газа-адсорбата (азота) в заданном соотношении. Процентное содержание компонентов в газовой смеси, прошедшей через ампулу с пробой образца, регистрирует детектор, снабженный блоком управления и термостабилизации. В качестве детектора используется датчик теплопроводности. Блок управления и термостабилизации обеспечивает постоянную температуру нити датчика, и формирует сигнал, пропорциональный концентрации азота в газовой смеси.



Рис. 1. Внешний вид и основные узлы анализатора «Сорбтометр-М002»



Рис. 2. Технологическая схема анализатора «Сорбтометр-М002»

Сигналы с детектора состава газовой смеси и датчика температуры поступают в устройство управления и обработки сигналов. По результатам измерений объема газа, сорбируемого на испытуемом образце при заданных значениях относительного парциального давления азота, управляющая программа по выбранному алгоритму (одно- или многоточечный метод БЭТ) рассчитывает значение удельной поверхности образца.

Анализатор «Сорбтометр-М002» обеспечивает снятие изотермы адсорбции в диапазоне парциальных давлений газа-адсорбата в рабочей смеси с газом-носителем в диапазоне от 0,02 до 0,98.

Определение удельной поверхности аморфного бора

При разработке методики определения удельной поверхности аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002» были учтены особенности работы с образцами данного материала, выбраны условия их предварительной подготовки перед измерениями, и определены оптимальные режимы работы анализатора с учетом рекомендаций разработчиков прибора из Института катализа им. Н. И. Борескова СО РАН (г. Новосибирск).

Для определения возможностей анализатора «Сорбтометр-М002» применительно к определению удельной поверхности образцов аморфного бора с различными значениями удельной поверхности, в данной работе изучались порошки бора марок Б-99А (партия № 27) и Б-99Б (партия № 26), изготовленные на ОАО «Авиабор» (г.Дзержинск), а так же порошок бора опытной партии В-4, полученный плазмохимическим методом в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (г. Москва). Согласно результатам анализа, значения удельной поверхности исследуемых образцов бора марок Б-99А и Б-99Б, определенные по методу Дерягина, составляют 9,6 и 17,6 м²/г соответственно, тогда как приблизительное значение удельной поверхности образца бора, полученного плазмохимическим методом, составляет ~100 м²/г по методу БЭТ.

Для получения предварительной информации о структуре и размерах частиц исследуемых материалов были проведены электронно-микроскопические (ЭМ) исследования образцов аморфного бора, изученных в данной работе. Характерные ЭМ изображения данных материалов, приведены на рис. 3–5.



Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения порошка аморфного бора марки Б-99А: а – при увеличении 16000×, б – при увеличении 50000×



Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения порошка аморфного бора марки Б-99Б: а – при увеличении 16000×, б – при увеличении 50000×



Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения порошка аморфного бора, полученного плазмохимическим методом: а – при увеличении 500×, б – при увеличении 12000×

Из электронно-микроскопических изображений следует, что образцы аморфного бора марок Б-99А и Б-99Б представляют собой ультрадисперсные порошки с частицами изодиаметричной формы и агломератов на их основе, при этом характерный размер частиц составляет величину менее 1 мкм. Образец аморфного бора, полученного методом плазмохимического синтеза, состоит из агрегатов различных размеров и формы, состоящих из гораздо более мелких частиц (менее 200–400 нм), что обусловлено методом его получения.

Согласно литературным данным [3], бор легко адсорбирует кислород и влагу из воздуха с образованием кислородсодержащих соединений (борная кислота и борный ангидрид). Присутствие в исследуемом материале этих и других примесных соединений, которые концентрируются на поверхности частиц бора, может оказывать негативное влияние на точность и воспроизводимость результатов измерений удельной поверхности по методу БЭТ (см., напр., [2]). Для получения точных и воспроизводимых результатов измерений поверхность частиц измеряемых образцов должна быть предварительно очищена от примесей. На анализаторе «Сорбтометр-M002» это достигается предварительной «термотренировкой» образцов, заключающейся в прогреве навески порошка при повышенной температуре в токе газа-адсорбата.

При выборе оптимальной температуры «термотренировки» было принято во внимание, что при «низких» температурах прогрева возгонка влаги и других примесей с поверхности частиц может проходить неэффективно, или будет занимать очень длительное время. С другой стороны, при «высоких» температурах окисление материала примесным кислородом, содержащимся в газе-адсорбате, может существенно интенсифицироваться, и оказать дополнительное негативное влияние на достоверность проводимых измерений.

Результаты серии экспериментов, проведенных с образцами аморфного бора для выбора оптималь-

ной температуры «термотренировки», показали, что наиболее оптимальной температурой, позволяющей проводить достаточно эффективную очистку поверхности частиц за приемлемое время, является температура 200 °С. Полученные результаты свидетельствуют, что прогрев образцов аморфного бора массой 0,5 грамма, помещенных в станцию подготовки образцов анализатора «Сорбтометр-М002», при температуре 200 °С в токе азота приводит к прекращению выделения газообразных примесей, находящихся в образце, через ~40 минут прогрева. Результаты получены в процессе длительной «термотренировки» с контролем процесса дегазации по датчику теплопроводности (см. рис. 6).



Рис. 6. Сигнал датчика теплопроводности (мкВ) при «термотренировке» образца аморфного бора массой 0,5 г при температуре 200°С

Таким образом, на основании проведенных экспериментов был установлен оптимальный режим проведения дегазации образцов аморфного бора, заключающийся прогреве навески порошка в токе азота при температуре 200 °C в течение 60 минут.

Перед началом работ, связанных с определением оптимальных режимов измерения удельной поверхности аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002», необходимо было установить принадлежность данного материала к одному из типов веществ, которые характеризуются определенной совокупностью адсорбционных свойств, проявляющихся в форме изотерм адсорбции. Изотерма адсорбции представляет собой зависимость сорбированного количества от давления газа (пара) при постоянной температуре. Так, по классификации, предложенной Брунауэром, Демингом и Теллером (см. [2, 4]), большинство изотерм физической адсорбции можно отнести к одному из пяти типов (см. рис. 7). Форма изотермы сорбции характеризует морфологию и физико-химические свойства поверхности адсорбента, и характер его взаимодействия с адсорбатом.

С целью установления принадлежности изотермы аморфного бора к одному из типов изотерм, приведенных на рис. 7, и для подтверждения возможности определения его удельной поверхности с помощью сервиса для обработки экспериментальных данных, встроенного в анализатор «Сорбтометр-М002», в данной работе была получена полная изотерма адсорбции данного материала при температуре жидкого азота (см. рис. 8).

Анализатор «Сорбтометр-М002» позволяет построить изотерму адсорбции исследуемого вещества по отдельным точкам, соответствующим измеренным значениям объемов газа-адсорбата при различных относительных парциальных давления газа в условиях сорбционного равновесия.

Изотерма адсорбции аморфного бора, приведенная на рис. 8, была получена в данной работе при относительных парциальных давлениях газа-адсорбата P/P_0 в смеси с газом-носителем в диапазоне от 0,05 до 0,97. Из рис. 8 видно, что изотерма близка к классическому II типу, присущему непористым или макропористым адсорбентам. Этот тип изотерм представляет свободную моно-полислойную адсорбцию, что позволяет использовать при обработке экспериментальных данных теорию метода БЭТ.



Рис. 7. Типы изотерм физической адсорбции



Рис. 8. Полная изотерма адсорбции аморфного бора при T_{адс}= -196 °C

Для определения оптимальных значений навески и плотности измеряемых образцов была проведена серия экспериментов с варьированием данных параметров в диапазоне 0,3-1,0 грамм и 0,2-1,5 г/см³ (образцы с насыпной плотностью и прессованные образцы). В результате было установлено, что для измерений аморфного бора оптимальная масса навески, позволяющая свободно размещать образец в ампуле адсорбера и при этом получать пик термодесорбции приемлемой интенсивности, составляет ~0,5 грамма. При этом увеличение плотности образца путем предварительного прессования порошка является нецелесообразным.

Во встроенном сервисе анализатора «Сорбтометр-М002», используемом для обработки экспериментальных данных и расчете значения удельной поверхности образца, предусмотрена возможность использования одноточечного и многоточечного методов БЭТ. Основное различие между этими методами заключается в следующем [2]. При использовании многоточечного метода БЭТ для расчета удельной поверхности по экспериментальным данным изотермы адсорбции строится график БЭТ в координатах «относительное давление – количество адсорбированного газа» путем аппроксимации полученных точек в диапазоне относительных парциальных давлений газа-адсорбата в рабочей смеси от 0,05 до 0,25 (рис. 9). При использовании одноточечного метода БЭТ на изотерме адсорбции строится только одна точка при относительном давлении 0,20, в этом случае график БЭТ строится по данной экспериментальной точке и выходит из начала координат. Таким образом, основное различие одно- и многоточечного методов БЭТ обусловлено учетом места пересечения графика БЭТ с осью ординат. Данный отрезок характеризует энергетическое взаимодействие между адсорбентом и адсорбатом, выражаемое константой БЭТ (константа С в уравнении (1)).

Из [2, 5] следует, что для веществ с достаточно высоким значением константы С различия между одно- и многоточечным методом БЭТ непринципиальны. При малых значениях константы С отрезок, отсекаемый графиком БЭТ на оси ординат, становится существенным, и различие между результатами, получаемыми этими методами, становится значительным. Исследования, проведенные нами для аморфного бора, показали, что значения константы С для этого материала находятся в диапазоне 140-160. В данном интервале значений константы С относительная погрешность между результатами измерения удельной поверхности, полученными одно- и многоточечным методом БЭТ, составляет менее 2,0 % [5]. Учитывая, что измерение одного образца аморфного бора (включая время проведения «термотренировки» образца) на анализаторе «Сорбтометр-М002» многоточечным методом БЭТ занимает примерно ~200 минут, а одноточечным методом ~90 минут, использование на практике второго метода для проведения типовых анализов является более предпочтительным. В то же время, в рамках данной работы на стадии разработки методики измерений для контроля получаемых значений удельной поверхности оба метода дублировались.

Для определения режимов проведения циклов адсорбции – десорбции азота необходимо было определить оптимальную температуру десорбции, позволяющую полностью удалить азот, адсорбированный образцом за один цикл. Для этого были проведены серии экспериментов с образцами бора разных марок, в которых температура десорбции, задаваемая оператором, варьировалась в диапазоне от -110до -80 °C. В ходе этих экспериментов было показано, что полное удаление адсорбированного газа с поверхности аморфного бора достигается при температуре -90 °C, и установление этой температуры в качестве температуры десорбции позволяет получать воспроизводимые результаты в параллельных экспериментах (см. рис. 10).

Таким образом, в результате проведенных исследований были установлены оптимальные режимы измерений удельной поверхности образцов аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002». Данные режимы приведены в табл. 1.

С использованием установленных режимов были проведены измерения образцов партий аморфного бора марок Б-99А (партия № 27) и Б-99Б (партия № 26), и опытной партии В-4, полученной плазмохимическим методом в ИМЕТ РАН. Результаты измерений приведены в табл. 2. Для сравнения значений удельной поверхности, полученных по методу БЭТ на анализаторе «Сорбтометр-М002» ($S_{\text{БЭТ}}$), со значениями, полученными на приборе Дерягина ($S_{\text{ДЕР}}$), был введен коэффициент K, рассчитываемый как:

$$K = S_{\rm E\Theta T} / S_{\rm MEP} \,. \tag{3}$$

Значения коэффициента К для исследованных материалов также приведены в табл. 2.

На основании данной таблицы, видно, что значения удельной поверхности аморфного бора, полученные на анализаторе «Сорбтометр-М002», в среднем в 0,64 раза меньше значений, полученных на приборе Дерягина. В первую очередь, данное различие объясняется разностью физических принципов методов измерения, во-вторых, по методу Дерягина измеряется лишь условная величина удельной поверхности, значительно зависящая от пористости материала.







Рис. 10. Типичная диаграмма адсорбции-десорбции азота

Таблица 1

Оптимальные режимы проведения измерений удельной поверхности образцов аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002»

Метод обработки данных	Масса навески, г	Плотность навески, г/см ³	Режим «термотренировки»	Температура десорбции, °С
Одноточечный метод БЭТ ~0,5		насыпная	Прогрев при 200°С в течение 60 минут в токе азота	минус 90

Таблица 2

Значения удельной поверхности образцов аморфного бора по БЭТ и по Дерягину

	Удельная	Удельная повер	Коэффициент	
Образец	поверхность	одноточечный	многоточечный	K
	<i>З_{ДЕР}</i> , м /1	метод	метод	
Бор марки Б-99А; п. №27	$9,6\pm0,4$	$6,56 \pm 0,22$	$6,54 \pm 0,22$	0,67
Бор марки Б-99Б; п. №26	$17,6 \pm 0,7$	$10,83 \pm 0,37$	$10,79 \pm 0,37$	0,61
Бор плазмохимический; п. В-4	нет данных	$101,62 \pm 3,46$	$101,51 \pm 3,45$	нет данных

Методика измерения удельной поверхности

На основании результатов проведенных исследований была разработана методика измерения удельной поверхности аморфного бора методом БЭТ на анализаторе «Сорбтометр-М002», которая была аттестована метрологической службой РФЯЦ-ВНИИЭФ в качестве индивидуальной методики измерений. Метрологические характеристики методики приведены в табл. 3.

Таблица З

Показатели точности измерения удельной поверхности порошка аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002» (*P* = 0,95; *n* = 3)

Метрологическая характеристика	Показатель
Диапазон измерения удельной поверхности, M^2/Γ	1–24
Верхняя граница относительного средне- квадратического отклонения, S _r ⁶	0,022
Границы относительной случайной погреш- ности, бе, %	± 2,5
Границы относительной неисключенной систематической погрешности (относительно СО), $\delta\theta$, %	± 2,3
Границы относительной суммарной по- грешности, б, %	$\pm 3,4$
Критерий годности результатов параллель- ных определений $X_{\max} - X_{\min} \le$, м ² /г	0,073 X _{cp}
Форма представления результатов измерений, м ² /г	$A \pm 0,034 \cdot A$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение $\overline{S}_{\rm БЭТ}$ (м²/г), полученное их трех параллельных определений удельной поверхности порошка.

Выводы

1. По результатам проведенных исследований показана целесообразность использования анализатора российского производства «Сорбтометр-М002» для определения удельной поверхности аморфного бора по методу БЭТ. Определены оптимальные режимы проведения измерений образцов со значениями удельной поверхности в диапазоне от ~6 до ~100 м²/г,

позволяющие получать достоверные и воспроизводимые результаты.

2. Разработана и аттестована лабораторная методика определения удельной поверхности аморфного бора на анализаторе «Сорбтометр-М002», с перспективой рассмотрения возможности ее дальнейшего использования на предприятиях РФ. В соответствии с данной методикой суммарная погрешность определения удельной поверхности аморфного бора составляет ± 3,4 %.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института катализа им. Н. И. Борескова СО РАН Пчелякову О.П., Титову В. П., Кирюшину Л. П. за активное участие в проводимых исследованиях. Сотрудникам НИО-19 Мирясову А. С. и Бучирину А. В. – за помощь в проведении экспериментов, а так же Мокрушину В. В. – за помощь в получении и интерпретации электронно-микроскопических изображений. Отдельная благодарность сотрудникам ИЯРФ Жоговой К. Б., Голубевой В. А., Волгутову В. Ю. за ценные замечания, сделанные в процессе выполнения работы, а также сотрудникам НИО-07 Пикулину И. В. и Куликову С. А. – за помощь в предоставлении образцов для исследований.

Литература

1. Громов В. В. Разделение и использование стабильных изотопов бора. М.: ВИНИТИ, 1990.

2. Фенелонов В. Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.

3. Самсонов Г. В., Марковский Л. Я., Хигач А. Ф., Валяшко М. Г. Бор, его соединения и сплавы. Киев: АН УССР, 1960.

4. Фенелонов В. Б., Мельгунов М. С. Адсорбционно-капиллярные явления и пористая структура катализаторов и адсорбентов. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т., 2010.

5. Вячеславов А. С., Померанцева Е. А. Измерение площади поверхности и пористости методом капиллярной конденсации азота. Методическая разработка. М.: Московский гос. ун-т., 2006.

РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ БОРТОВОЙ И НАЗЕМНОЙ АППАРАТУРЫ

А. И. Егоров, <u>С. Н. Коянкин</u>, А. Г. Кузякин, И. А. Малахов

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

Сокращения, используемые в докладе:

БМК – базовый матричный кристалл;

ВИП – вторичный источник питания;

ГОЧ – генератор опорной частоты;

ДЦ – дизайн-центр;

ИУ – исполнительное устройство;

КМКПД – контроллер мультиплексного канала передачи данных;

КПОС – контроллер приема и первичной обработки сигналов;

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство,

ПВВФ – повышенные внешние воздействующие факторы;

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство,

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

ПО – программное обеспечение;

ПП – приемопередатчик;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СБИС – сверхбольшая интегральная схема;

СНК – система на кристалле;

ЦВМ – цифровая вычислительная машина;

ЦП – центральный процессор;

ASIC – Application Specific Integrated Circuits;

GPIO – general-purpose input/output (интерфейс ввода/вывода общего назначения);

JTAG – Joint Test Action Group (стандарт IEEE 1149);

RISC – Restricted (reduced) instruction set computer (компьютер с сокращенным набором команд);

SoC – System on a Chip;

VHDL – Very high speed integrated circuit Hardware Description Language.

Введение

Постоянные требования по уменьшению габаритов и увеличению вычислительной производительности управляющих систем привели к появлению нового класса устройств, которые получили название «системы на кристалле». Под этим определением скрываются перепрограммируемые, полу-заказные и заказные микросхемы, содержащие большинство необходимых для вычислительного устройства функциональных блоков.

Основная цель данной работы – это разработка унифицированной платформы для создания цифровых вычислительных машин на основе сложнофункциональных блоков. Возможности конфигурирования платформы позволяют проектировать вычислительные модули и модули обработки данных, отвечающие требованиям наземной и бортовой аппаратуры. Результаты проектирования могут быть реализованы в виде интегральных схем класса СНК. Унифицированная платформа предоставляет ядра центрального процессора и периферии на выбор, средства проектирования программного обеспечения, операционные системы, тесты, отладочные платы и некоторые готовые решения по реализации ЦВМ.

В докладе рассмотрен подход к разработке системы на кристалле, состоящей из центрального процессора с системой команд RISC-V и периферийных блоков, таких как контроллер памяти, контроллер МКПД по ГОСТ Р 52070-2003, GPIO контроллер, UART контроллер, SPI контроллер, USB контроллер. Представлены результаты логического синтеза и моделирования функциональных тестов некоторых ЦП.

Кроме того, в докладе рассмотрены вопросы проектирования цифровых вычислительных устройств на основе системы на кристалле с точки зрения особенностей аппаратного и программного обеспечения.

Элементная база

Основой для проектирования всех современных вычислительных устройств являются СБИС. С точки зрения внутренней структуры СБИС можно разделить на ПЛИС, БМК и полностью заказные схемы (ASIC). Основное отличие между ними заключается в том, что в ПЛИС и в БМК производителями жестко закладывается внутренняя архитектура базовых блоков, за пользователем остается выбор, как эти блоки соединить, а в полностью заказных схемах пользователь имеет возможность полностью определять архитектуру микросхемы. Преимущества и недостатки рассмотренных типов СБИС приведены в табл. 1.

		Таблица	1
Сравнение	характеристик ПЛИС,	БМК	
	и заказных схем		

Характеристики	ПЛИС	БМК	Заказные СБИС		
Энергонезависимость	+/-*)	+	+		
Низкое энергопотребление	+**)	++	+++		
Быстродействие	+	++	+++		
Стойкость к ПВВФ	-	+	+		
Перепрограммируемость	+	-	-		
Быстрый цикл разработки устройства	+	-			
Низкие затраты на произ- водство	+	-			
Отсутствие затрат на изго- товление экспериментальных образцов	+	+/-*)	+/-*)		
Стоимость изделий при крупносерийном производстве	-	+	+		
Примечание: * — в зависимости от производителя;					

** – в сравнении с эквивалентным устройством на дискретных элементах.

Разработкой СБИС занимаются специализированные отделы проектирования, или так называемые дизайн-центры. В зависимости от требований технического задания выбирается тот или иной тип СБИС, и хотя они сильно отличаются, маршрут проектирования для них схож. Актуальный на сегодняшний день маршрут проектирования СБИС включает в себя три основных этапа: ввод проекта на языке высокого уровня VHDL или Verilog, синтез проекта в выбранном базисе и, наконец, размещение на кристалле. В случае с ПЛИС все три этапа выполняются непосредственно разработчиками устройства, если же применяется БМК или заказная СБИС, то размещением на кристалле занимаются специалисты завода-изготовителя БМК. Этапы проектирования СБИС приведены на рис. 1. Цифрами условно показаны уровни участия ДЦ в процессе проектирования в зависимости от возможностей ДЦ и завода-изготовителя.



Рис. 1. Этапы проектирования СБИС

Ядро центрального процессора

В основе любой ЦВМ находится центральный процессор. Опыт отечественных [1], [2] и зарубежных разработчиков показывает, что встраивание в СНК высокопроизводительного центрального процессора приводит к возрастанию универсальности СНК. Кроме того, это позволяет быть полностью независимыми от производителей конкретных процессоров и СБИС. Имея ядро центрального процессора внутри СНК можно менять технологическую платформу СБИС, сохраняя при этом все наработки по программному обеспечению. Сейчас насчитываются сотни программных ядер центральных процессоров. Для выбора самого оптимального решения нами были выдвинуты следующие основные критерии:

– лицензионная чистота – ядро должно быть открыто и свободно, а значит лицензия должна предоставлять свободу изучения, свободу модификации, свободу распространения копий; большинство высокопроизводительных ядер, например с системами команд ARM, этому критерию не удовлетворяют; ядро должно оперировать с 32-х или 64-х разрядными числами – восьмиразрядные ядра хотя и занимают мало места на кристалле, однако не обеспечивают заданный уровень производительности;

– платформонезависимость – в ядре не должно быть блоков, привязанных к определенной технологической платформе, этому критерию не соответствуют, например, такие ядра, как MicroBlaze (фирма Xilinx) и Nios II Fast (фирма Altera).

Указанным критериям удовлетворяют ядра, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Открытые и свободные ядра центральных процессоров

Система команд	Ядро		
OpenRISC 1000	OpenRISC 1200, Altor32, Carpe, OR1knd, mor1kx, ORbuild		
MIPS I	Plasma		
SPARC v8	Leon3		
ARMv2	Amber		
RISC-V [3]	PicoRV32, Rocket, Hardfloat, Uncore, Sodor, RIVER, pulpino		

Другими требуемые критерии:

 масштабируемость – ядро должно иметь возможность конфигурирования на уровне подключаемых вычислительных блоков; – системные шины – ядро должно иметь общепринятые системные шины для подключения периферийных блоков (например, AMBA или Wishbone);

 наличие заказных СБИС на основе ядра – данный опыт косвенно свидетельствует о качестве реализации;

 наличие средств проектирования программного обеспечения;

- высокая производительность;

 – занимаемое место на кристалле – СНК с ядром должна занимать мало места, чтобы быть размещенной в доступных нам СБИС.

В табл. 3 приведена сводная информация по площади рассматриваемых ядер после синтеза.

Моделирование всех ядер проводилось в пакетном автоматическом режиме с использованием сценария. Результаты моделирования программы, скомпилированной под каждый ЦП с оптимизацией и без, сведены на рис. 2. По оси абсцисс указан номер вычислительного цикла, а по оси ординат — время выполнения тестовой задачи в мс, которое затрачивает ЦП на вы полнение данного цикла.

Проанализировав доступные ядра на соответствие указанным критериям, мы остановились на архитектуре RISC-V как самой современной, производительной и широко применяемой. Для бортовых применений было выбрано 64-разрядное ядро RIVER с аппаратной поддержкой вещественной арифметики, а для пультовой аппаратуры – 32-разрядное целочисленное ядро PicoRV32.

Таблица 3

Сравнение результатов синтеза						
Критерии	SPARC Leon	ARM	MIPS	OpenRISC Mor1k	RISC-V Pulpino	
Площадь комбинационной логики	30555592	739022	2952515	13452962	2110479	
Площадь последовательностной логики	44286783	561859	1039500	15768648	958381	
Общая площадь	74842375 ¹⁾	1300881	3992015	29221610 ²⁾	3068861	
Общая площадь в вентилях	1979957	34414	105608	773058	81186	
Примечания: 1) ЦП с кэш-памятью; 2) ЦП с FPU;						



Рис. 2. Сводная таблица результатов моделирования ЦП

Система на кристалле

Для того чтобы минимизировать габариты ЦВМ и увеличить ее производительность все чаще применяются системы на кристалле. СНК (SoC), или однокристальная система — электронная схема, вы полняющая функции целого устройства (например, компьютера) и размещенная на одной интегральной схеме.

Принципиальные особенности подхода СНК заключаются в:

 интеграции на одну микросхему технологической платформы (как правило, сверхвысокой степени интеграции) функционально законченного набора модулей управления и обработки данных;

 организации потока данных внутри системы непосредственно между контроллерами, а не через микропроцессорную шину;

 – ориентации встроенного микропроцессора преимущественно на задачи управления (см. рис. 3) [4].



Рис. 3. Обобщенная схема СНК

Рассмотрим основные функции, выполняемые СНК в составе бортового специализированного вычислителя, структурная схема которого приведена на рис. 4.:

- ЦП реализация определенного алгоритма управления;
- контроллер МКПД обеспечение взаимодействия с системой управления;
- контроллер ПОС прием и первичная обработка сигналов датчиков;
- контроллер ИУ управление работой исполнительных устройств;
- ОЗУ сохранение переменных данных ЦП.

СНК для наземной аппаратуры выполняет аналогичные функции при большем количестве интерфейсов.

При разработке СНК мы применяем FuseSoC – новый генератор описаний СНК, который не только предоставляется ядра с системами команд RISC-V, OpenRISC 1000 и многими другими, но также управляет ядрами периферии и позволяет легко настраивать и генерировать СНК. По своей сути он является менеджером пакетов и набором инструментов для сборки HDL-кода (например, VHDL). Основной целью FuseSoC является увеличение объема повторного использования IP-ядер и быть вспомогательным средством для создания, построения и моделирования CHK.

Менеджер пакетов можно рассматривать как ПО apt, portage, yum, dnf, pacman для случая IP-ядер ПЛИС/ASIC. Обычно в простом ini-файле описывается какие необходимы файлы ядра, зависимости от других IP-ядер, и где FuseSoC должен получить код этих ядер.

Коллекция ядер вместе с описанием верхнего уровня называется системой, и системы могут быть смоделированы или переработаны в САПР от производителей ПЛИС для построения загружаемых прошивок ПЛИС.



Рис. 4. Структурная схема специализированного вычислителя

FuseSoC облегчает следующие рутинные операции (рис. 5):

– повторное использование кода;

 – создание конфигураций для компилирования и исполнения;

 многократный запуск регрессивного тестирования;

 портирование систем на новые аппаратные платформы;

- обмен кодом ядер со сторонними проектами;

– настройка непрерывной компоновки СНК.

Основные свойства FuseSoC:

– легкость в применении – для работы с FuseSoC большинству существующих проектов не требуется модернизации; любые специализированные исправления проектов для работы с FuseSoC могут быть применены непосредственно со время создания проекта или моделирования;

модульность – генератор может быть использован во всем стандартном маршруте проектирования СНК, он может создавать проектные файлы для САПР или же встраиваться в специфичный маршрут;

– стандартизированная структура – могут применяться как стандартные форматы IP-ядрер, такие как IP-XACT, так и специализированные;



Рис. 5 Этапы работы с FuseSoC

– расширяемость – поддерживается симуляция в GHDL, Icarus Verilog, Isim, ModelSim, Verilator и Xsim; генератор также поддерживает создание прошивок ПЛИС в САПР Lattice Semiconductor Project Icestorm, Xilinx ISE и Vivado, Altera Quartus. Для организации поддержки нового САПР достаточно написать всего лишь около 100 строчек кода;

- нетребовательность к ресурсам ПК;

свобода использования, модернизации и распространения – генератор не накладывает ограничений на свое применение и дает возможность управления как корпоративными, так и публичными ядрами;

 проверка множеством проектов – FuseSoC успешно применяется для создания и симуляции таких проектов, как Nyuzi, Pulpino, VScale, различные OpenRISC CHK, picorv32, osvvm и многие другие;

– ресурсоемкость – стандартная библиотека ядер на данный момент включает более 100 ядер, в том числе ЦП, периферийные контроллеры, внутренние соединения, законченные СНК и библиотечные утилиты. В дополнение к стандартной библиотеке можно добавить сторонние библиотеки и ядра.

Унифицированная платформа для разработки ЦВМ и маршрут проектирования устройств на основе СНК

Для ускорения разработки ЦВМ нами была подготовлена унифицированная платформа, включающая в себя следующие блоки:

– набор ядер ЦП (32-х и 64-битные) и периферии (МКПД по ГОСТ Р 52070-2003, GPIO, UART, SPI, USB);

– средства проектирования программного обеспечения – для создания своего программного обеспечения имеется набор инструментальных средств от проекта GNU, которые позволяют разрабатывать ПО на языках С и С++. При создании ПО под процессоры RISC-V используется кросс-компиляторы. Набор инструментов исполняется главном компьютере и генерирует бинарный код программ или библиотек, которые могут быть запущены потом на процессоре;

– операционные системы – FreeRTOS, ZephyrOS, Linux, RTEMS;

тесты, проводящие формальную верификацию
СНК и измеряющие производительность;

 – отладочные комплекты на основе плат «Марсоход3» (производитель ООО «Инпро Плюс», город Таганрог);

 – готовые решения для бортовой и наземной аппаратуры.

Данная платформа охватывает все основные этапы проектирования:

– разработка аппаратного обеспечения;

– разработка ПО;

- функциональное моделирование аппаратуры;

– отладка, симуляция и тестирование ПО;

 совместное моделирование аппаратного и программного обеспечения;

– прототипирование вычислительного устройства.

Создание и расширение такой платформы в дальнейшем позволит многократно сократить сроки разработки ЦВМ.

Разработка приемопередатчика интерфейса USB на отечественной элементной базе

В процессе создания унифицированной платформы для разработки ЦВМ перед нами одной из основных целей было импортозамещение в части применяемой элементной базы. При наличии отечественных микросхем ПЛИС, БМК, приемопередатчиков МКПД и RS-232, дискретные ПП USB отсутствуют, хотя данный интерфейс широко применяется в контрольно-технологической аппаратуре. Поэтому нами было принято решение реализовать такой ПП на отечественной элементной базе.

ПП на основе схемы из спецификации интерфейса USB «Universal Serial Bus. Specification. Revision 2.0. 2000» представлен на рис. 6. Для обеспечения работы встроенного в СБИС контроллера USB требуется компаратор (например, 1467CA3T), два триггера Шмитта (например, 5584TЛ2AT) и два буфера с третьим состоянием (например, 5584AП6AT). В зависимости от технологии изготовления СБИС данные элементы можно интегрировать внутри СНК. После блока, реализующего описанный физический уровень USB, внутри СНК следует IP-ядро, реализующее протокольную часть.



Рис. 6. Приемопередатчик USB

Заключение

В докладе был рассмотрен накопленный опыт проектирования унифицированной СНК, показаны особенности элементной базы и проектирования СНК. Проведен анализ доступных ядер центральных процессоров. Рассмотрена разработанная платформа для проектирования ЦВМ, а также показан способ реализации ПП USB.

Представленные в докладе подходы к проектированию позволяют многократно увеличить скорость проектирования с одновременным улучшением характеристик ЦВМ.

Литература

1. Стешенко В., Руткевич А., Бумагин А., Гулин Ю., Воронков Д., Гречищев Д., Евстигнеева Е., Синельникова М. Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер. Компоненты и технологии, 2008, № 10.

2. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004.

3. http://riscv.org/

4. Шагурин И. Системы на кристалле. Особенности реализации и перспективы применения. Электронные компоненты, 2009, № 1.

СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОДУЛЯ РЕВЕРСЕРОВ С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЯЧЕЙКАМИ ПОККЕЛЬСА И СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ

О. Я. Лисовский, М. Ю. Стрельцов

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

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается лазерная установка [1], в которой для получения энергии используется четырехпроходная схема усиления лазерного импульса полной апертуры (подобные схемы используются в мировых аналогах [2]). Такая схема позволяет уменьшить длину лазера и оптимизировать конструкцию силового усилительного модуля установки. Схема структурная лазерного канала силового усилительного модуля представлена на рис. 1. В лазерном канале используется принцип углового разведения пучков в разных проходах и устройство, называемое реверсер [3]. Реверсер – это оптическое устройство, предназначенное для возвращения лазерного излучения после второго прохода назад в главный усилитель. Реверсер включает в себя затвор оптический на базе ячейки Поккельса с плазменными электродами, который предотвращает развитие самовозбуждения в главном усилителе до прихода импульса лазерного излучения от системы формирования опорного излучения. Схема функциональная реверсера на базе ячейки Поккельса представлена на рис. 2.



Рис. 1. Схема структурная лазерного канала силового усилительного модуля



Рис. 2. Схема функциональная реверсера на базе ячейки Поккельса с плазменными электродами

Описание образца

Модуль реверсеров состоит из двух блоков реверсеров, включает в себя 56 оптических элементов, обеспечивающих работу 8-ми каналов силового усилительного модуля. Общий вид блока реверсеров представлен на рис. 3. Габаритные размеры: длина – 19000 мм, ширина – 450 мм, высота – 2300 мм. Блок реверсеров включает в себя блок зеркал поворотных, блок линз, блок затворов оптических, которые связаны между собой системой световодов и образуют единый герметичный объем, заполняемый азотом под избыточным давлением.

Герметичные боксы блоков установлены на безлюфтовые регулируемые опоры и представляют собой силовые каркасы, сваренные из профильных труб, закрытые легкими съемными герметизирующими панелями. Внутри боксов располагаются регулируемые платформы с оптическими элементами. Световоды установлены на подставках и представляют собой трубы прямоугольного сечения (сваренные из листа) со стыковочными фланцами. Также в системе имеются световоды, обеспечивающие гибкую развязку между блоками за счет применения резиновых компенсаторов.

В герметичных боксах блока зеркал поворотных и блока затворов оптических располагаются оправы зеркал поворотных и оправы зеркал ретрансляционных соответственно. Оправы являются исполнительными элементами системы автоматической юстировки (САЮ) и позволяют проводить дистанционную прецизионную юстировку зеркал относительно вертикальной и горизонтальной осей при помощи приводов с шаговыми двигателями. Оправы зеркала поворотного и зеркала ретрансляционного представлены на рис. 4.

В герметичном боксе блока затворов располагаются затворы *оптические*. Затвор включает в себя оправы поляризаторов, ячейку Поккельса, генератор управляющего импульса, которые являются исполнительными элементами системы автоматического управления ячейками Поккельса (САУ ЯП). Затвор оптический представлен на рис. 5.







Рис. 5. Затвор оптический

Оптический узел ячейки Поккельса закреплен на трех шарнирных опорах, две из которых оснащены приводами с датчиками положения, что позволяет осуществлять автоматический переход в рабочее и юстировочное положения. Оправы поляризаторов так же оснащены приводами.

Ячейка Поккельса через коллектор и гибкие трубопроводы подключаются к системе вакуумирования и газообеспечения установки, при этом каждая ячейка снабжена отдельными ручным и электромагнитным клапанами.

В герметичном боксе блока линз располагаются оправы линз реверсера. Оправа позволяет плавно перемещать линзу реверсера по трем координатам и поворачивать относительно вертикальной и горизонтальной осей с высокой точностью (всего 5 степеней свободы). Оправа линзы реверсера представлена на рис. 6.



Рис. 6. Оправа линзы реверсера

На торцевой панели блока затворов оптических располагаются четыре панели разъемов, на которых установлены силовые, высокочастотные, оптические проходные герметичные разъемы для подключения элементов, управляемых дистанционно, к САЮ и САУ ЯП.

В целях отказа от дорогостоящих покупных оптических проходных разъемов была разработана конструкция герметичного проходника для оптических кабелей. Герметизация оптического кабеля осуществляется за счет применения герметизирующего компаунда. Проходник устанавливается на панель разъемов через уплотнительное кольцо. Общий вид панели разъемов представлен на рис. 7.



Рис. 7. Панель разъемов

Расчеты

При разработке изделия были проведены необходимые оценочные прочностные расчеты, подтверждающие работоспособность отдельных наиболее нагруженных узлов.

Герметизирующие панели испытывают значительные нагрузки, что связано с заполнением блоков реверсеров азотом с избыточным давлением. Наибольшую нагрузку испытывают панели блока затворов оптических (ввиду наибольших размеров). Для уменьшения прогиба панелей и нагрузки на крепежные элементы было принято решение об использовании разгрузочных кронштейнов, обеспечивающих одновременно дополнительное крепление панели на силовом каркасе и удобство монтажа. Данное решение позволило значительно сократить массу панелей по сравнению с вариантом использования более толстого листа или с вариантом введения ребер жесткости. Панель была рассчитана на прочность в программном модуле «APM Structure 3D» [4] с использованием поверхностно-стержневой модели. Распределение перемещений по результатам расчета представлено на рис. 8. Максимальный прогиб составил 3 мм, что является приемлемой величиной (для сравнения, прогиб панели той же толщины без разгрузочных кронштейнов составил 23 мм, что является неприемлемым). Так же по результатам расчета были получены значение сил, действующих на крепежные элементы и разгрузочные кронштейны. На основании чего был проведен прочностной расчет разгрузочного кронштейна в программном модуле «APM Studio» [4].



Рис. 8. Распределение перемещений по результатам расчета панели

Система световодов блока реверсеров располагается на подставках. Сварная часть подставки была рассчитана на прочность под суммарной нагрузкой от четырех световодов в программном модуле «APM Structure 3D» с использованием стержневой модели. По результатам расчета была подобрана конфигурация подставки, обеспечивающая достаточную прочность и жесткость при относительно небольшой металлоемкости с учетом конструктивных и технологических требований. Распределение перемещений и напряжений по результатам расчета подставки представлены на рис. 9.


Рис. 9. Расчет подставки: а – распределение перемещений, б – распределение напряжений.

Выводы

При создании модуля реверсеров авторами поэтапно были решены следующие задачи: разработана схема деления изделия на составные части, компоновки составных частей, трехмерные модели в системе «Компас-3D», проведены необходимые оценочные прочностные расчеты наиболее нагруженных узлов с использованием программных модулей «APM Studio» и «APM Structure 3D» и последующая оптимизация элементов конструкции.

Литература

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. Концепция построения лазерной установки нового поколения // Сборник докладов XXXIX Международной конференции по физике плазмы и УТС. Москва, 2012. С 17.

2. Stolz C. J. The National Ignition Facility: The world's largest optical system // Optical Design and Testing III, Proc. of SPIE Vol. 6834–683402. P. 2–9.

3. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И. 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.

4. Шелофаст В. В., Замрий А. А., Розинский С. М., Шанин Д. В., Алехин А. В. З 44 Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. М: Изд-во АПМ. 2013.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

<u>Р. Ю. Литвинов</u>, А. В. Романов, С. И. Буртасов, М. В. Данилкин

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

Введение

Основной задачей при разработке образца ВиВТ является обеспечение надежности каждой его составной части и образца в целом, в том числе при эксплуатации в сложных (жестких) климатических условиях. Источники электропитания, в том числе и химические источники тока (ХИТ), являются неотъемлемой частью большинства образцов ВиВТ, поэтому вопросы обеспечения надежности ХИТ начинают решать уже на этапе выбора электрохимической системы и конструктивного исполнения ХИТ.

В настоящее время, наряду с требованиями надежности ХИТ, заказчиком ВиВТ все чаще выставляются требования по эргономике ХИТ. Это требования к простоте и удобству изделия в эксплуатации, требующие оперативного контроля готовности ХИТ к эксплуатации: контроль степени разряженности (контроль остаточной ёмкости) и контроль степени деградации (степени ухудшения электрических параметров).

Актуальность проблемы

Наиболее перспективной электрохимической системой ХИТ для образца ВиВТ представляется литий-ионная. Возможности диагностирования состояния отечественных литий-ионных аккумуляторов в настоящее время изучены слабо или недостаточны для решения прикладных задач. К тому же, информация о технических характеристиках ХИТ опытного, а зачастую и серийного изготовления доступна в ограниченном объёме и не содержит сведений о работоспособности ХИТ при воздействии многих видов климатических, механических и специальных факторов. Ограниченность информации обусловлена отсутствием у разработчика ХИТ технической возможности проведения дополнительных испытаний (исследований) или причиной не востребованности потребителями ХИТ с такими характеристиками.

Проведение дополнительных исследований и испытаний, накопление информации о полных технических характеристиках и диагностических методах ХИТ в базе знаний позволит не только описать более точно «общую картину», типичную для выбранной электрохимической системы, но и определить четкие критерии для принятия решений при диагностировании конкретных типов ХИТ.

Основные вопросы

В данной работе проведены исследования XИТ литий-ионной электрохимической системы с целью:

 подтверждения заявленных технико-эксплуатационных характеристик ХИТ;

 прогнозирования работоспособности ХИТ при критических температурах;

– выявления функциональных зависимостей для выбора метода диагностирования остаточной емкости ХИТ.

Метод исследований

Исследованиям подвергались три аккумуляторные батареи 2ЛИА-4. В ходе исследований измерялись напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) батарей и напряжение батарей под нагрузкой (Uн) при разной остаточной емкости батареи. Емкость заряженной батареи (4 А.ч) принималась за 100 %. Батарея помещалась в термокамеру, выдерживалась при нужной температуре в течение 1 часа и затем проводились измерения НРЦ и Uн. Uн измерялось как среднее значение напряжения батареи за время 0,1 сек. при подключении к нагрузке с током потребления 1 А (2 А, 3 А). Измерения проводились при тем пературах +25, +50, 0, -25, -50°С. Далее батарея разряжалась током 2 А в течение 12 минут, что соответствует уменьшению емкости 0,4 А.ч, или на 10 % от номинальной емкости. После разряда батарея выдерживалась в течение 12 часов для восстановления НРЦ, и измерения повторялись.

Результаты исследований

На диаграммах (рис. 1-4) приведена зависимость Uн батареи от остаточной емкости при различных токах нагрузки.

При токе нагрузки, близком к номинальному току разряда батареи (0,8 A), Uн соответствует диапазону рабочих напряжений батареи при температурах от +50 до -25 °C. При температуре -50°C Uн батареи находится ниже допустимого диапазона рабочих напряжений (отмечен на диаграммах пунктирной линией). Это говорит о невозможности использования батареи при температурах ниже предела, установленного в ТУ на батарею (-30 °C). При токе нагрузки, превышающем номинальный ток разряда батареи, Uн батареи соответствует диапазону рабочих напряжений батареи при положительных температурах.

При отрицательных температурах Uн батареи находится ниже допустимого диапазона рабочих напряжений, отмечались случаи срабатывания схемы защиты батареи. (Рис). Следует отметить, что порог срабатывания защиты батареи составляет 2,5 В.



Рис. 1. Зависимость Uн от степени заряда при токе нагрузки 1А



Рис. 2. Зависимость Uн от степени заряда при токе нагрузки 2A



Рис. 3. Зависимость Uн от степени заряда при токе нагрузки 3A



Рис. 4. Напряжение на батарее при срабатывании защиты

На диаграммах (рис. 5–8) приведены зависимости НРЦ и Uн батареи от остаточной емкости при различных значениях температуры окружающей среды. Можно отметить, что разница между значениями НРЦ и Uн батареи не меняется с уменьшением величины остаточной емкости батареи и при одинаковых значениях температуры окружающей среды носит линейный характер. Зависимость Uн от остаточной емкости батареи и может быть использована для оценки состояния батареи по величине Uн, при этом необходимо учитывать температурный коэффициент.



Рис. 5. Зависимость НРЦ и Uн от степени заряда при температуре +25 ⁰C



Рис. 6. Зависимость НРЦ и Uн от степени заряда при температуре +50 °C



Рис. 7. Зависимость НРЦ и Uн от степени заряда при температуре 0 ⁰С



Рис. 8. Зависимость НРЦ и Uн от степени заряда при температуре –25 °C

На диаграмме (рис. 9) приведена типовая зависимость НРЦ батареи от остаточной емкости. Зависимость носит линейный характер и может быть использована для оценки состояния батареи по величине НРЦ.



Рис. 9. Зависимость НРЦ батареи от степени заряда при температуре +25°C

На диаграмме (рис. 10) приведена зависимость НРЦ батареи от остаточной емкости при различных значениях температуры окружающей среды. При значениях остаточной емкости батареи 50 % от номинальной и менее, с уменьшением температуры окружающей среды отмечается незначительное увеличение НЦР батареи.



Рис. 10. Зависимость НРЦ батареи от степени заряда при различных температурах окружающей среды

Заключение

1. Подтверждены заявленные технико-эксплуатационные характеристики батареи 2ЛИА-4. Батарея работоспособна при номинальном разрядном токе в диапазоне температур от -25 до +50 °C. При токе разряда, превышающем номинальный, батарея работоспособна при положительных температурах.

2. В ходе исследований выявлено, что порог срабатывания защиты батареи составляет 2,5 В. При использовании батареи для питания нагрузки без контроля напряжения, возможно уменьшение ресурса батареи (количество циклов заряда – разряда) из-за глубокого (ниже допустимого значения) разряда батареи.

3. Работа батареи при критических тем пературах невозможна, при тем пературе –50 °C даже у полностью заряженной батареи при ном инальном токе нагрузки напряжение падает ниже допустимого значения.

4. Характер зависимости НРЦ и Uн от степени заряда позволяют использовать эти параметры для определения состояния батареи. Предпочтительней использовать НРЦ, так как этот параметр менее зависит от температуры окружающей среды.

Литература

1. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и Аккумуляторы. Оборудование для исптытаний и эксплуатации. Справочник. СПб.: 2005.

2. Хрусталев А. А. Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003.

3. Справочник Химические источники тока. Коровин Н. В. 2003.

4. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы. 2002.

РАЗРАБОТКА КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

<u>М. И. Мигачев</u>, С. В. Вертей, И. В. Ишеева

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

Введение

Развитие различных отраслей радиотехники (радиоразведки и радиопротиводействия, связи с подвижными объектами, радиоуправления, радиотелеметрии, радиоастрономии) вызвало практическую потребность в антеннах, обеспечивающих одновременную работу в двух независимых радиочастотных диапазонах.

В данной работе описан опыт разработки и экспериментального исследования двухдиапазонной антенны, выполненной на основе короткозамкнутого коаксиального резонатора [1], который обеспечивает прием/передачу по двум развязанным радиочастотным каналам.

Целью работы является разработка двухдиапазонной антенны, предназначенной для излучения радиосигналов по двум независимым радиочастотным каналам.

Результаты теоретических расчетов

Кольцевая щелевая антенна представляет короткозамкнутый с одной стороны коаксиальный резонатор, который состоит из внутреннего и внешнего цилиндров. Возбуждение антенны осуществляется в двух точках, сдвинутых друг относительно друг друга на 90° , при помощи штыря. В точках, противоположных точкам питания, устанавливаются короткозамкнутые штыри между внутренним и внешним цилиндром (рис. 1).



Рис. 1. Кольцевая щелевая антенна

Достоинствами данной антенны являются стабильность характеристик излучения (ширина ДН, коэффициент эллиптичности) в широком диапазоне частот и простое конструктивное исполнение. Недостатком данной антенны является сложность согласования антенны в широком диапазоне частот.

Кольцевая щель выполняется при помощи коаксиального резонатора, имеющего вид четвертьволнового металлического стакана [1]. Питание к резонатору подводится коаксиальным фидером.

Если средняя длина периметра резонатора $\pi(r_1 + r_2) \ll \lambda$, в резонаторе существует и наиболее интенсивно возбуждается только волна типа ТЕМ. Напряжение в щели при настройке стакана в резонанс распределяется равномерно, на поверхности цилиндра возникают продольные электрические токи, и получается антенна, подобная цилиндрическому вибратору. ДН этой антенны в меридиональной плоскости существенно зависит от длины возбуждаемого цилиндра.

Если же $\pi(r_1 + r_2) > \lambda$ в резонаторе, кроме волны типа ТЕМ, существует и возбуждается волна типа H₁₁ коаксиальной линии, у которой критическая длина волны $\lambda_{\rm kp} \approx \pi(r_1 + r_2)$. Выберем длину резонатора l равной $\lambda/2$. Тогда волна типа ТЕМ окажется подавленной, в то время как волна типа H₁₁, у которой длина волны в линии определяется выражением

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{(1 - (\lambda/\lambda_{\rm kp}))^2}},$$
 будет существовать. Напря-

жение в щели окажется распределенным в азимутальном направлении по закону синуса, при этом на цилиндре возникнут, помимо продольных, поперечные составляющие поверхностных электрических токов, и излучение антенны существенно изменится. Вследствие поперечных составляющих токов появится излучение вдоль оси цилиндра, причем ДН слабо зависит от длины возбуждаемого цилиндра.

Недостатком антенны с одной точкой питания является невозможность одновременной работы антенны в двух частотных диапазонах.

Данный недостаток был устранен путем трансформации элементов конструкции известной кольцевой щелевой антенны, а именно, было предложено ввести вторую точку питания, смещенную относительно первой точки питания на 90⁰, а также установить в полости между цилиндрами проводящие штыри, точки соединения с цилиндрами которых расположены диаметрально противоположно первой и второй точкам питания соответственно. Таким образом, введение дополнительной точки питания смещенной относительно первой на угол 90⁰ позволило разделить рабочие каналы по поляризации и обеспечить развязку между точками питания порядка 10 дБ, тем самым обеспечив одновременную работу антенны в двух частотных диапазонах [2].

По результатам расчетов, кольцевая шелевая антенна формирует однонаправленные ДН с шириной по уровню половинной мощности не менее $2\theta_{0,5} = 70^{\circ}$ в двух диапазонах частот $\Delta F_1 = F_1 \pm 15$ МГц и $\Delta F_2 =$ $= F_2 \pm 15$ МГц. Развязка между входами составила не менее 15дБ.

Экспериментальные исследования макета кольцевой щелевой антенны

На рис. 2 представлен макет разработанной кольцевой щелевой антенны.

Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 1, при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны на частотах F_1 – 15 МГц, F_1 и F_1 + 15 МГц приведены на рис. 3.



Рис. 2. Макет кольцевой щелевой антенны

Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 2, при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны на частотах $F_1 - 15$ МГц, F_1 и $F_1 + 15$ МГц приведены на рис. 4.



Рис. 3. Экспериментальные ДН макета кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 1, на частотах: а – F₁ – 15 МГц, б – F₁, в – F₁ + 15 МГц, — вертикальная плоскость, ------ горизонтальная плоскость



Рис. 4. Экспериментальные ДН макета кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 2, на частотах: а - F₁ - 15 МГц, б - F₁, в - F₁ + 15 МГц, — вертикальная плоскость, ------ горизонтальная плоскость

Значения ширины ДН по уровню половинной мощности при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны и значения КУ в главном направлении для антенны, запитываемой по входу 1 и по входу 2, на частотах $F_1 - 15$ МГц, F_1 и $F_1 + 15$ МГц представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения ширины ДН и КУ для антенны, запитываемой по входу 1 и по входу 2 на частотах $F_1 - 15$ МГц, F_1 и $F_1 + 15$ МГц

Частота, МГц		Вход 1		Вход 2			
	Ширина ДН		ĽУ	Шири	иw		
	2θ ^r ,	2θв,	ку, лБ	2θ ^r ,	2θв,	ку, лБ	
	град	град	дь	град	град	др	
F ₁ -15	76	76	7,3	85	78	7,2	
F_1	76	78	7,3	83	77	7,2	
F ₁ +15	75	78	7,4	81	76	7,3	

Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 1, при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны на частотах F_2 –15 МГц, F_2 и F_2 +15 МГц приведены на рис. 5. Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 2, при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны на частотах $F_2 - 15$ МГц, F_2 и $F_2 + 15$ МГц приведены на рис. 6.

Значения ширины ДН по уровню половинной мощности при вертикальной и горизонтальной поляризациях измерительной антенны и значения КУ в главном направлении для антенны, запитываемой по входу 1 и по входу 2, на частотах $F_2 - 15$ МГц, F_2 и $F_2 + 15$ МГц представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения ширины ДН и КУ для антенны, запитываемой по входу 1 и по входу 2 на частотах $F_2 - 15$ МГц, F_2 и $F_2 + 15$ МГц

	I	Зход 1		Вход 2			
Частота,	Шири	на ДН	νv	Шири	νv		
ΜГц	2θ ^r ,	2θв,	ку, лБ	2θ ^r ,	2θв,	πБ	
	град	град	др	град	град	дБ	
$F_2 - 15$	74	76	7,4	81	76	7,3	
F_2	74	76	7,5	78	74	7,4	
F ₂ +15	73	76	7,5	78	74	7,4	





Рис. 5. Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 1, на частотах: а - F2-15 МГц, б -F2, в – F2+15 МГц, — – вертикальная плоскость, ----- – горизонтальная плоскость







Рис. 6. Экспериментальные ДН кольцевой щелевой антенны, запитываемой по входу 2, на частотах: а – F₂-15 МГц, б – F₂, в – F₂+15 МГц, — – вертикальная плоскость, ----- – горизонтальная плоскость

На рис. 7 представлен график измеренных значений КСВ кольцевой щелевой антенны по входам 1 и 2.



На рис. 8 представлен графики зависимости коэффициента развязки между входом 1 и входом 2 кольцевой щелевой антенны.



Рис. 8. Коэффициент развязки между входами 1 и 2 кольцевой щелевой антенны

Заключение

Таким образом, результаты измерения показывают, что использование разработанной кольцевой щелевой антенны позволяет осуществлять прием/передачу сигналов в двух разных частотных диапазонах. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования макета разработанной антенны. В процессе разработки антенны был проведён патентный анализ и подана заявка для проверки на патентоспособность технического решения. В результате проверки на патентоспособность был получен патент на изобретение № 2593422.

Литература

1. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975.

2. Пат. № 2593422 РФ МПК Н01Q 13/10. Кольцевая щелевая антенна / С. В.Вертей, М. И. Мигачев // Бюл. № 22. 2016.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАДРАТНОГО ВОЛНОВОДА

И. В. Ишеева, С. В. Вертей, <u>М. И. Мигачев</u>

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

Введение

Развитие различных отраслей радиотехники (радиоразведки и радиопротиводействия, связи с подвижными объектами, радиоуправления, радиотелеметрии, радиоастрономии) вызвало практическую потребность в антеннах, обеспечивающих излучение и прием эллиптически поляризованного поля в заданном диапазоне частот.

Примером антенн с эллиптической поляризацией излучаемого поля может быть антенна на основе открытого конца квадратного волновода с поляризатором из диэлектрической пластины [1]. Для питания подобных антенн используется устройство, позволяющее одновременно возбуждать две ортогонально поляризованные волны H₁₀ и H₀₁ с равными амплитудами.

В данной работе описан опыт разработки и экспериментального исследования устройства возбуждения квадратного волновода.

Результаты теоретических исследований

На рис. 1 представлен вариант выполнения устройства возбуждения квадратного волновода (главный вид с разрезом, рис. 1а и вид спереди, рис. 1б).

Устройство возбуждения квадратного волновода (рис. 1) содержит прямоугольный волновод 1 с короткозамыкателем 2, плавный волноводный переход 3 от прямоугольного поперечного сечения к квадратному поперечному сечению, коаксиальную линию 4, две металлические пластины 5 и 6, два металлических гребня 7 и 8 [2].

Вход плавного волноводного перехода 3 от прямоугольного поперечного сечения к квадратному поперечному сечению соединен с прямоугольным волноводом 1. При этом стороны поперечного сечения прямоугольного волновода 1 повернуты на 45° относительно сторон поперечного сечения выхода плавного волноводного перехода 3. Каждая металлическая пластина 5, 6 установлена в центре соответствующей широкой стенки прямоугольного волновода 1, при этом металлические пластины 5, 6 расположены симметрично относительно продольной оси устройства возбуждения квадратного волновода. Металлические гребни 7, 8 установлены в плавном волноводном переходе 3 симметрично относительно продольной оси с изменяющимся зазором между ними. В металлическом гребне 7 в плоскости сочленения плавного волноводного перехода 3 и прямоугольного волновода 1 выполнено отверстие, в котором расположена коаксиальная линия 4. Центральный проводник 9 коаксиальной линии 4 удлинен в зазор между металлическими гребнями 7 и 8 соединен с другим металлическим гребнем 8. При этом металлические пластины 5 и 6 и гребни 7 и 8 лежат в одной плоскости продольного сечения устройства возбуждения квадратного волновода [3].



Рис. 1. Устройство возбуждения квадратного волновода: а – главный вид в разрезе, б – вид спереди; 1 – прямоугольный волновод, 2 – короткозамыкатель, 3 - плавный переход, 4 – коаксиальная линия, 5,6 – металлические пластины, 7, 8 – металлические гребни, 9 – центральный проводник коаксиальной линии, 11 – фланец

Короткозамы катель 2 выполняют в виде пластины, которую устанавливают на свободном конце прямоугольного волновода 1.

На выходе плавного волноводного перехода 3 могут быть закреплены стандартный фланец 10, необходимый для подсоединения устройства возбуждения квадратного волновода к стандартным СВЧ-узлам.

Устройство возбуждения квадратного волновода работает следующим образом.

Посредством фланца 10 устройство возбуждения квадратного волновода присоединяется к входу возбуждаемого устройства (рис. 2). Сигнал поступает в коаксиальную линию 4 и возбуждает в пространстве между металлическими гребнями 7 и 8 электромагнитную волну типа H_{10} , которая на выходе плавного волноводного перехода 3 делится на равно амплитудные ортогонально поляризованные волны H_{10} и H_{01} Для обеспечения широкополосного согласования коаксиальной линии 4 с выходом плавного волноводного перехода 3 применяются:

 короткозамкнутый шлейф, образованный прямоугольным волноводом 1, металлическими пластинами 5, 6 и короткозамыкателем 2,

– металлические гребни 7, 8 с плавно изменяющимся зазором между ними, обеспечивающие плавную трансформацию волнового сопротивления коаксиальной линии 4 к волновому сопротивлению возбуждаемого квадратного волновода 3.



Рис. 2. Макет антенны на основе квадратного волновода с поляризатором в виде пластины из диэлектрика и устройством возбуждения

Таким образом, использование описанной выше конструкции позволяет возбудить в квадратном волноводе ортогонально поляризованные волны H_{10} и H_{01} с равными амплитудами при помощи коаксиальной линии без увеличения продольных размеров устройства и подавить высшие типы волн.

На рис. 3 представлены диаграммы направленности (ДН) волноводной антенны, рассчитанные на частотах $F_0 - \Delta$ МГц, F_0 и $F_0 + \Delta$ МГц для антенны на основе квадратного волновода с поляризатором в виде пластины из диэлектрика и устройством возбуждения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.



Рис. 3. ДН волноводной антенны, рассчитанные на частотах: $a - F_0 - \Delta M \Gamma \mu$, $\delta - F_0$, $B - F_0 + \Delta M \Gamma \mu$; — вертикальная плоскость, – – – горизонтальная плоскость

На рис. 4 представлен график рассчитанного значения коэффициента стоячей волны (КСВ) волноводной антенны.



Рис. 4. Рассчитанное значение КСВ волноводной антенны

Экспериментальные исследования макета антенны на основе квадратного волновода с поляризатором и устройством возбуждения

ДН волноводной антенны, полученные экспериментально на частотах $F_0 - \Delta$ МГц, F_0 и $F_0 + \Delta$ МГц для измерительной антенны на основе квадратного волновода с поляризатором в виде пластины из диэлектрика и устройством возбуждения при вертикальной и горизонтальной поляризациях, приведены на рис. 5.

На рис. 6 представлен график измеренного значения КСВ волноводной антенны.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований волноводной антенны на основе квадратного волновода с поляризатором в виде пластины из диэлектрика и устройством возбуждения приведены в таблице.

Частота, МГц		Шири	на ДН	Коэффи- циент усиления		Коэффи- циент эл- липтичности		
	20 ^г , град		20 ^в , град		Teon	okan	TOOP	OKOH
	теор.	эксп.	теор.	эксп.	reop.	JKCII.	reop.	SKell.
$F_0 - \Delta$	68,5	70,8	66,5	72,5	8,9	8,2	0,8	0,8
F_0	78,0	83,9	73,4	81,4	8,4	7,9	0,8	0,85
$F_0 + \Delta$	77,5	83,0	83,3	92,4	7,6	6,6	0,87	0,85

Результаты теоретических и экспериментальных исследований волноводной антенны



Рис. 5. Экспериментальные ДН макета волноводной антенны на частотах: а - *F*₀- Δ МГц, б - *F*₀, в - *F*₀+ Δ МГц, — вертикальная плоскость, - - - горизонтальная плоскость



Рис. 6. КСВ макета волноводной антенны

Заключение

Таким образом, использование разработанного устройства возбуждения позволяет возбудить в квадратном волноводе две ортогонально поляризованные волны H₁₀ и H₀₁ с равными амплитудами при помощи коаксиальной линии без увеличения продольных размеров устройства и подавить высшие типы волн. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования макета волноводной антенны на основе квадратного волновода с поляризатором в виде пластины из диэлектрика и устройством возбуждения. В процессе разработки устройства возбуждения квадратного волновода был проведён патентный анализ и подана заявка для проверки на патентоспособность технического решения. В результате проверки на патентоспособность был получен патент на изобретение № 2634334.

Литература

1. Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиа пазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1975.

2. Фельда Я. Н. Техника сверхвысоких частот. М.: Советское радио, 1952.

3. Пат. № 2634334 РФ МПК Н01Q 21/24. Устройство возбуждения квадратного волновода / С. В. Вертей, М. И. Мигачев, И. В. Девина // Бюл. № 31. 2017.

РАЗРАБОТКА ВАКУУМПЛОТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СО СТАБИЛЬНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

К. В. Муравьева

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Эффективность и функциональность современной радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени зависят от стабильности свойств и экономической доступности используемых для этих целей материалов, а также их поведения в процессе эксплуатации [1, 2]. В большинстве изделий СВЧ-техники в силу конструктивных особенностей требуется вакуумплотная керамика с определенными и стабильными значениями диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

К важным характеристикам материалов относятся минимальный разброс значений их свойств и стабильность показателей в течение срока службы. Керамика относится к материалам с очень хорошей стабильностью свойств в течение длительного времени. Существенными недостатками изготовления вакуумплотных изделий из корундовой керамики по существующей технологии являются высокая температура обжига (1600–1800) °С и рабочая среда обжига: водород или вакуум [5]. Это обуславливает высокие энергозатраты и повышенную опасность производства.

В настоящее время с развитием глобальных спутниковых навигационных систем ведутся интенсивные разработки бортовой аппаратуры спутниковой навигации. К данным приборам предъявляются жесткие требования по стойкости и прочности к воздействиям внешних факторов, а также к массогабаритным характеристикам при постоянном наращивании функциональных возможностей. Особую актуальность приобретает задача миниатюризации приемных антенн. Внешний вид антенны представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид микрополосковой антенны

Поскольку микрополосковые антенны имеют элементы, настраиваемые на требуемую рабочую частоту, важное значение приобретает разброс диэлектрических параметров керамического материала. Однако разброс значений диэлектрических свойств для подавляющего большинства традиционных керамических материалов чаще всего ограничен только с одной стороны, с формулировками «не более» или «не менее».

Достижения последних лет в области технологии убедительно показали, что возможности создания новых керамических материалов далеко не исчерпаны [3, 4].

Успехи в первую очередь связаны с развитием методов получения высокодисперсных порошков, использованием основного компонента оксида алюминия (Al_2O_3) в виде устойчивой α – фазы с процентным содержанием не менее 94 % и введением новых модифицирующих добавок. Поэтому имеются достаточные основания для замены традиционных материалов на новый керамический материал с улучшенными свойствами и с пониженной температурой спекания в воздушной среде.

По ранее разработанной технологии керамика изготавливалась путем мокрого измельчения и перемешивания отдельно взятых компонентов глинозема ГН и нерастворимых оксидов MgO и TiO₂ в форме рутила. При введении добавки в виде отдельных компонентов MgO и TiO₂ даже при длительном перемешивании происходило неравномерное распределение компонентов в объеме глинозема. Это являлось главной причиной нестабильности свойств керамики.

В настоящей работе в качестве исходного сырья использовался молотый и немолотый глинозем марок ГН, ГК-1 и ГЭФ.

Исследование микроструктуры поверхности образцов из керамики на основе немолотого глинозема марок ГН, ГК-1, ГЭФ показало наличие пористых, прочных и крупных агрегатов, затрудняющих спекание заготовок до высокой плотности и не позволяющих использовать немолотое сырье. Поэтому в данной работе использовалось сырье глинозема марок ГН, ГК-1, ГЭФ, предварительно прокаленное и измельченное в водной среде до определенной удельной поверхности с размером частиц от 1 до 3 мкм.

В качестве исходных компонентов для разработки и изготовления эвтектической добавки были использованы порошки углекислого магния MgCO₃ и оксида TiO₂ в форме анатаза, которые предварительно измельчались и смешивались в водной среде в течение 1 ч. Полученная добавка подвергалась термообработке на воздухе. Введение разработанного состава эвтектической добавки в глинозем при мокром измельчении и перемешивании позволило проводить процесс обжига керамических заготовок в воздушной среде при пониженной температуре спекания.

Для обжига заготовок на воздухе использовался режим, графически представленный на рис. 2.



Рис. 2. Режим спекания и обжига вакуумплотной керамики: участок А – период сушки, В – период подъема температуры, С – период выдержки при максимальной температуре, D – период охлаждения вместе с печью, Tm – максимальная температура обжига; t_s – время выдержки при максимальной температуре

По разработанному маршруту, представленному на рис. 3, были изготовлены пять партий вакуумплотной керамики на основе различных марок глинозема, 90 комплектов заготовок излучателей общим количеством 360 шт. и образцы-свидетели для контроля материала и качества обжига.



Рис. 3. Блок – схема мар шрута изготовления вакуумплотной керамики и изделий на ее основе



Рис. 4. Внешний вид заготовок

Образцы-свидетели контролировались по внешнему виду на отсутствие вздутий, включений, пузырей, трещин, и на соответствие электрофизических параметров (диэлектрическая проницаемость ε , тангенс угла диэлектрических потерь tg δ , предел прочности при статическом изгибе $\delta_{изг}$, водопоглощение W, плотность ρ , пористость П) установленным требованиям по действующим на предприятии методикам.

Сравнительные характеристики традиционной широко применяемой керамики ВК-94-1, нашей более ранней разработки «Кортим» и нового материала «Кармелит» приведены в таблице.

Сравнительные характеристики основных
показателей керамики ВК-94-1, «Кортим»,
«Кармелит»

Основные показатели	ВК-94-1	«Кортим»	«Кармелит»
Диэлектрическая проницаемость є	≤10,3	8,9–10,6	9,5±0,2
Тангенс угла диэлек- трических потерь tg δ	≤6.10-4	≤6·10 ⁻⁴	(2-4) ·10 ⁻⁴
Кажущаяся плотность, г/см ³	≥3,65	≥3,6	3,65-3,86
Водопоглощение, %	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	0,001-0,009
Открытая пористость, %	$\leq 0,2$	≤0,2	0,01–0,034
Предел прочности при изгибе, не менее, МПа	320 (для материалов по ОСТ 11 0309 от 49 до 149)	160	240
Температура обжига, °С	1600–1800	1550	1550
Среда обжига	водород, формиргаз	воздух	воздух
Продолжительность цикла обжига, ч	48	21,5	10

Разработанные состав и технология изготовления вакуумплотной керамики, получившей наименование «Кармелит», на основе различных марок глинозема изготавливаются полностью из отечественного сырья и гарантируют высокую повторяемость значений относительной диэлектрической проницаемости материала в пределах 9,5±0,2 от партии к партии при стабильно малой величине диэлектрических потерь tg δ , которая не превышает $6,0\cdot 10^{-4}$. Дополнительные параметры керамики: водопоглощение 0,001–0,009 %; кажущаяся плотность 3,65–3,86 г/см³; открытая пористость 0,01–0,034 % и предел прочности при статическом изгибе свыше 240 МПа. Температура спекания нового материала не превышает 1550 °C, среда спекания – воздух.

Новый материал успешно применен при создании приемных антенн бортовой аппаратуры спутниковой навигации. Свойства материала обеспечили отсутствие необходимости корректировки размеров излучателей для подстройки их в зависимости от диэлектрической проницаемости материала и возможность конструктивного совмещения антенны с электронным блоком, исключив разъемные кабельные соединения между ними и существенно снизив габариты и массу аппаратуры.

Литература

1. Непочатов Ю. К. Автореферат диссертационной работы: Разработка составов и технологии получения корундовой бронекерамики с радиопоглощающим феррит-содержащим покрытием. Томск, 2014.

2. Амелина О. Д. Разработка бесспековой технологии вакуумплотной керамики группы ВК-100 для нужд электронной техники: дис. канд. техн. наук 05.27.06. Москва, 2016.

3. Ротенберг Б. А. Керамические конденсаторные диэлектрики. С-Пб.: ОАО НИИ «Гириконд», 2000.

4. Бакунов В. С., Беляков А. В. и др. Оксидная керамика: спекание и ползучесть. М.: Издательский центр РХТУ им. Менделеева, 2007.

5. Гаршин А. П. и др. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003.

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ МИКРОСХЕМ С ЦЕПЬЮ АВТОКОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Н. Ф. Асмолова, И. Ю. Забавичев, <u>К. А. Насеткин</u>, А. А. Потехин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Исторически полевые транзисторы со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП транзисторы), изготовленные по технологии «кремний-наизоляторе» (КНИ МОПТ, международный термин «Silicon-On-Insulator», SOI MOSFET), появились достаточно давно как элементы схем специального применения. До начала 90-х гг. ХХ в. КНИ технологии не рассматривались как серьезная альтернатива коммерческой объемной технологии, главным образом, из-за своей дороговизны. Однако в 90-х гг. ХХ в. выяснилось, что КНИ МОПТ имеют существенные функциональные преимущества перед транзисторами обычных объемных технологий с неизолированной подложкой. В настоящее время технология КНИ является доминирующей [1] для изготовления высокоинтегрированной электроники как коммерческого (класс «industrial»), так и специализированного (классов «military» и «space») применений.

Активная область КНИ МОП транзистора, именуемая базой или «телом» (международный термин «body»), представляет собой тонкую кремниевую пленку между контактами стока и истока, изолированную со всех сторон слоями окислов. Скрытый или «захороненный» окисел (международный термин «buried oxide», BOX), в КНИ структурах изолирует активную область прибора от подложки, а вертикальная изоляция существенно ограничивает токи утечки и тиристорный эффект между двумя соседними приборами при радиационном воздействии.

Транзисторы, изготовленные по технологии КНИ, обладают рядом важных преимуществ над транзисторами объемных технологий с аналогичной проектной нормой:

1. Область стока/истока расположена прямо над скрытым окислом, поэтому изоляция скрытым окислом имеет существенно меньшую емкость, чем изоляция p-n переходом в объемных транзисторах, что объясняется большей толщиной скрытого окисла и меньшей диэлектрической проницаемостью окисла по сравнению с кремнием. Это дает уменьшение паразитных емкостей (на 30...50 %) и соответствующее увеличение быстродействия из-за уменьшения времени задержки.

2. По той же причине, из-за уменьшения паразитной емкости, уменьшается динамическое энергопотребление (приблизительно на 30% при той же тактовой частоте и напряжении питания). 3. Улучшается электростатическое качество транзисторов за счет подавления геометрических короткоканальных эффектов. Повышается (на ~15 %) плотность интеграции за счет уменьшения расстояния между транзисторами.

4. В КНИ схемах отсутствуют эффекты влияния общей подложки на пороговые напряжения, как это имеет место в схемах объемной КМОП технологии.

5. КНИ транзисторы могут иметь очень малое (близкое к минимальному) значение подпорогового размаха (~60 мВ/декада при комнатных температурах), что позволяет снизить пороговое напряжение до 0,3 В, не увеличивая статические токи утечки. Соответственно, это позволяет уменьшать напряжения питания и динамическое энергопотребление.

6. Из-за высокой степени изоляции перекрываются пути для развития паразитного тиристорного эффекта (эффекта «защелки»), часто имеющего место в n-p-n-p структурах объемных КМОП технологий.

7. Боковая изоляция (например, изоляция типа «птичий клюв» (LOCOS), мелкими канавками (STI)) дает возможность более компактного расположения элементов и более простой технологии изготовления, поскольку нет необходимости в карманах и глубоких канавках, как это имеет место в объемной технологии.

Радиационные эффекты в изделиях микроэлектроники при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений можно разделить на 2 большие группы [2]: одиночные события и постепенная деградация, связанная с накоплением заряда на ловушках, генерируемых в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик. Большинство отказов, связанных с накоплением заряда, являются параметрическими, они предсказуемы и возможен их расчет на основе детерминированного подхода. Одним из методов, реализующих схемотехническую защиту от постепенной деградации, является схема автокомпенсации напряжения подложки [3]. Работа схемы следующая: при постепенном накоплении заряда в объеме окисла и на поверхности раздела кремнийдиэлектрик через транзистор начинает протекать паразитный ток. Это изменение фиксируется схемой автокомпенсации, которая автоматически меняет напряжение на подложке, тем самым компенсируя накапливаемый заряд. В данной работе проведены экспериментальные исследования реакции микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений, а также предложена модель, альтернативная

широко используемой в настоящее время BSIMSOI-RAD [4, 5].

Математическая модель

Схему, которая реализует компенсирующее напряжение, можно заменить функциональной зависимостью линейного изменения напряжения автосмещения в зависимости от накопленного заряда [3]. Так как на пластине находятся миллионы транзисторов, не представляется возможным моделировать всю схему целиком. Однако, за счет того, что все они в схемотехническом плане подключены параллельно, за рабочую модель можно взять один облучаемый транзистор.

Для моделирования процессов в транзисторах МОП структуры КНИ часто применяют математические модели, основанные на методе эквивалентной схемы. Суть метода состоит в замене отдельных элементов, т.е. конструктивных частей транзистора, радиотехническими элементами: конденсаторами, резисторами и источниками токов и напряжений. Такой подход позволяет разбить весь комплекс взаимосвязанных процессов, протекающих в приборе, на составные части, для каждой из которых может быть применен аналитический подход к вычислению токов, напряжений и иных параметров, характеризующих процессы в анализируемом приборе. В результате обобщения удается синтезировать общую модель транзистора, позволяющую проводить расчеты радиотехнических схем на основе данных о конструкции, уровнях легирования, подвижности и иных характеристик полупроводниковых слоев и областей из которых составлен интересующий нас транзистор.

Основной моделью, используемой в пакетах моделирующих программ на данный момент, является BSIMSOI [6, 7]. На рис. 1 представлено поперечное сечение активной области полевого транзистора КМОП структуры КНИ для стандартной модели BSIMSOI.



Рис. 1. Поперечное сечение полевого транзистора КМОП структуры КНИ: GATE – затвор; SOURSE – исток; DRAIN – сток; SUBSTRATE – подложка; BOX – заглубленный слой диэлектрика; BODY – подзатворная область; INTERNAL BODY BIAS – напряжение смещения подзатворной области

Рассматриваемая модель позволяет вычислить проводимость индуцированного канала, возникающего в подзатворной области при подаче управляющего напряжения на затвор. Потенциал V_p , приложенный с помощью специального контакта к подзатворной области, позволяет минимизировать токи утечки исток-сток, когда транзистор находится в состоянии «закрыто».

Для вычисления тока в стандартной модели BSIMSOI используются следующие соотношения [6, 7]

$$I_{ds} = \frac{I_{ds0}}{1 + \frac{R_{ds}I_{ds0}}{V_{dseff}}} \left(1 + \frac{V_{ds} - V_{dseff}}{V_A}\right),$$
 (1)

$$I_{ds0} = \frac{\beta V_{gseff} \left(1 - A_{bulk} \frac{V_{dseff}}{2 \left(V_{gseff} - 2v_t \right)} \right) V_{dseff}}{1 + \frac{V_{dseff}}{E_{sat} L_{eff}}}, \quad (2)$$

$$\beta = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W_{eff}}{L_{eff}},$$
(3)

где R_{ds} – сопротивление исток – сток, μ_{eff} – подвижность в подзатворной области; E_{sat} – критическая напряженность поля в канале, при которой скорость носителей заряда достигает насыщения; V_A – коэффициент для учета модуляции длины канала, C_{ox} – емкость, определяемая подзатворным диэлектриком, A_{bulk} – выражение для объемного заряда; V_{ds} – напряжение исток-сток V_{gs} – напряжение исток-затвор, I_{ds} – ток исток – сток.

Модель BSIMSOI непосредственно не содержит параметров, отвечающих за учет радиационного воздействия. Поэтому был разработан ряд дополнений к указанной модели, позволяющих учесть радиационное воздействие. В настоящее время в отечественной практике доминирующим является подход, предложенный в работах [4, 5]. В данных работах вводится зависимость подвижности от дозы, описываемая следующим выражением

$$\mu_{eff}\left(D\right) = \frac{\mu_0}{1 + \alpha N_{it}\left(D\right)},\tag{4}$$

$$N_{it}(D) = a_{it}D^{b_{it}}, \qquad (5)$$

где α , a_{it} и b_{it} – подгоночные коэффициенты.

Такой подход дает хорошие результаты для схемотехнического анализа, однако дает неверные результаты при физическом моделировании. Подвижность не может зависеть от величины накопленного заряда, так как на микроскопическом уровне определяется частотой рассеяния носителей, то есть несовершенствами кристаллической решетки полупроводника. При радиационном воздействии подвижность может меняться только за счет структурных повреждений. Рентгеновское излучение с энергией квантов менее сотен килоэлектронвольт не вызывает структурных повреждений, а значит подвижность не должна меняться.

Таким образом, подобный феноменологический подход существенным образом зависит от топологии структуры и требует большого объема дорогостоящих калибровочных облучательных экспериментов при ее изменении. Поэтому более перспективным является подход, основанный на изменении емкостей МОП структур при облучении.

При воздействии ионизирующего излучения на КНИ транзистор накапливается заряд на границе раздела кремний-диэлектрик. Тем самым изменяется пространственное распределение электрического поля, управляющего транзистором. Межэлектродная емкость вычисляется как производная от заряда соответствующего электрода по напряжению между интересующими электродами

$$C_{ij} = \frac{dQ_i}{dV_i}.$$
 (6)

Важно отметить, что емкость, также, как и подвижность, входит в качестве сомножителя в выражение (3), что обусловливает эквивалентность предлагаемого подхода с традиционным со схемотехнической точки зрения. Однако, с позиций физического моделирования, предлагаемая модель обладает преимуществом по сравнению с традиционным подходом, так как в настоящее время существуют хорошо разработанные теоретические представления накопления заряда и изменения емкости в МОП структурах [8, 9].

Результаты и их обсуждение

При построении модели оказалось, что разброс критически важных для расчета параметров по нормативным документам велик. Как видно для примера на рис. 2 распределение параметра «сопротивление контактного окна» между слоями имеет нормальное распределение для партии пластин, на которых производился эксперимент.





Совокупность параметров дает широкие границы изменения радиационно-критического параметра –

напряжения смещения подложки в зависимости от дозы облучения для микросхем из разных партий пластин, узкие – для микросхем из одной партии. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными представлено на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость напряжения смещения на подложке от времени облучения: — – результаты расчета границ изменения радиационно-критического параметра для микросхем из разных партий; - - – расчет изменения радиационно-критического параметра для «усредненной» структуры; × – данные облучательных экспериментов. Длительность облучения – 1,0 отн. ед.

При достижении напряжения смещения подложки 3В автосмещение перестает работать, что приводит к параметрическому отказу микросхемы. Следует отметить, что в ходе проведенных облучательных экспериментов не достигнут уровень воздействия, достаточный для параметрического отказа.

Из графика зависимости, рис. 3, видно, что в ходе эксперимента проводилось 2 измерения над микросхемами с одинаковой топологией. Результаты получились очень близкими, потому что микросхемы из одной партии пластин.

Результаты расчетов зависимости напряжения смещения на подложке совпадают с экспериментальными данными с погрешностью, меньшей дозиметрической, что показывает адекватность предлагаемого подхода.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИЯРФ ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» за проведение облучательных экспериментов в рамках совместных работ и С. В. Оболенскому за полезные замечания при подготовке теоретической части работы.

Литература

1. International roadmap for devices and systems: 2017 edition. More Moore

2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004.

3. А.с. 1408424 СССР кл. G 05 F 1/56. Устройство для автоматического смещения напряжения подложки интегральной схемы / А. С. Свердлов, Б. М. Соскин

4. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОПтранзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия ВУЗов. Электроника. 2011. №1(87). С. 20–28.

5. Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Орехов Е. В. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учета влияния гамма- и нейтронного излучения на полупроводниковые приборы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6(131). С. 77–82. 6. BSIMSOI3.1 Mosfet model user's manual // BSIM group, US Berkeley, 2003.

7. P. Su, "An International Standard Model for SOI Circuit Design," // Ph. D. Dissertation, Department of EECS, University of California at Berkeley, December 2002. (http://www.eecs.berkeley.edu/~pinsu).

8. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

9. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники // Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008.

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ СКОРОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ

В. П. Гандурин, С. И. Герасимов, В. А. Кузьмин, <u>И. А. Одзерихо</u>

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

При транспортировании взрывоопасных грузов возникает проблема обеспечения безопасности при аварийных механических воздействиях, которые имеют место при авиационных авариях, столкновения транспортных средств, техногенных катастрофах. Одним из решений этой проблемы является демпфирование энергии удара. В качестве демпфера в защитных конструкциях часто используется древесина. При проектировании этих конструкций широко используется численное моделирование. Для адекватного описания поведения материала при динамических нагрузках необходимо знать параметры модели, учитывающие особенности деформирования.

В работе представлена изотропная упруго-пластическая модель деформирования сосны, березы и осины с параметрами, учитывающие влияние скорости деформации, в диапазоне скоростей деформаций 600...3000 с⁻¹. Параметры подбирались на основе экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению удара. Проведено численное моделирование с использованием указанной модели и подобранными параметрами с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС. Проведена верификация принятой модели по диаграммам деформирования, полученных экспериментально.

Введение

Свойство древесины деформироваться при сжатии в широком диапазоне деформаций (30-40) % при практически постоянном напряжении позволяет отнести ее к материалам, способным амортизировать ударные нагрузки. Как амортизатор древесина не пропускает через себя нагрузку, превышающую предел ее прочности. Поэтому древесину часто используют в качестве ограничителя аварийных ударных нагрузок (демпферов) при транспортировании грузов. Древесина как конструкционный материал обладает рядом положительных свойств: она имеет относительно высокую прочность, небольшую плотность, малую теплопроводность, легко поддается механической обработке. Вместе с тем, древесина имеет и ряд особенностей, одним из которых является анизотропия механических свойств материала. Также механические свойства древесины зависят от многих других факторов: с увеличением влажности прочность древесины снижается; древесина большой плотности имеет более высокую прочность; на прочность древесины влияет процент поздней древесины, наличие пороков, гнили, строение. Эти факторы приводят к достаточно большому диапазону разброса данных о механических свойствах древесины.

При проектировании различных конструкций (в том числе защитных конструкций) широко используется численное моделирование. Для адекватного описания поведения материала при динамических нагрузках необходимо знать параметры модели, учитывающие особенности деформирования.

В настоящей работе представлена изотропная упруго-пластическая модель деформирования с кинематическим упрочнением для сосны, березы и осины с параметрами модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) при комнатной температуре (+20 °C), которые учитывают влияние скорости деформации, для разных углов вырезки образцов. Параметры подбирались на основе экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению нагружения, представленных в [1] с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС [2]. Эксперимент проводился на установке [3], реализующей методику Кольского и разрезного стержня Гопкинсона (РСГ).

Постановка и результаты эксперимента

Приведены данные о методике и результатах экспериментов, проведенных в работе [1].

Для исследования свойств сосны, березы и осины были изготовлены образцы в виде цилиндров диаметром ~ 20 мм и высотой ~ 10 мм с различным направлением вырезки по отношению к оси ствола дерева. Углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон составляли 0^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 и 90^0 . Влажность образцов составляла ~ 10 %.

Установка содержала ударник, нагружающий стержень и опорный стержень диаметром 20 мм, изготовленного из алюминиевого сплава Д16Т. Образец располагался между опорным и нагружающим стрежнем. Нагружающий стержень имел длину 1,5 м, опорный стержень — 4,5 м, что позволяло регистрировать основной и два дополнительных цикла нагружения. На рис. 1–3 приведены диаграммы деформирования $\sigma \sim \varepsilon$ образцов березы, сосны и осины с различными углами вырезки при температуре +20 °С, причем каждая порода древесины представлена двумя диаграммами: одна характерна для «упругого» деформирования образцов при малой (600...800 с⁻¹) скорости деформации и сохранении их целостности, другая характеризует поведение материалов в случае их разрушения (при скоростях деформациях 1500...3000 с⁻¹). Диаграммы располагаются на оси деформации условно с разнесением на оси деформации.

В табл. 1 приведены некоторые статические характеристики древесины.

На основе результатов экспериментов [1] и данных других источников [4–9], были определены параметры упруго-пластической модели деформирования с изотропным упрочнением для древесины, учитывающей скорость деформирования. Проведено численное моделирование с использованием указанной модели деформирования образцов древесины в условиях испытаний на установке РСГ.



Рис. 1. Диаграммы деформирования образцов березы

Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов сосны



Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов осины

Таблица 1

Статические свойства испытуемых пород древесины										
Порода древесины	Начальная	D HOMELO OTH 0/	Модуль упругости	и при сжатии, МПа	Предел прочности вдоль					
	плотность, г/см ³	Блажность, 70	вдоль волокон	поперек волокон	волокон при сжатии, МПа					
Береза	0,62		16 660	1124	45					
Сосна	0,59	15	16 600	1126	44					
Осина	0,50		_	_	37					

Численное моделирование

На рис. 4 приведена расчетная конечно-элементная модель задач численного моделирования, реализующая нагружение образцов древесины на установке РСГ. Задачи решалась в двумерной осесимметричной постановке. В конечно-элементной сетке использовались четырехузловые элементы. Модель содержит 243360 элементов и 256362 узлов. Для конечноэлементной модели была проведена верификация, которая показала, что для получения достоверных значений уровней деформаций оптимальным размером элемента является 0,5×0,5 мм.

Для образцов древесины задавалась упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением, а для ударника, нагружающего и опорного стержней – упругая модель.

Для описания контактного взаимодействия между расчетными областями был использован контактный алгоритм с использованием метода штрафа и с коэффициентом трения µ = 0,01.

В качестве граничных условий задавалась жесткая заделка опорного стержня, а также запрещались перемещения узлов нагружающего и опорного стержня по двум степеням свободы.

В области упругих деформаций поведение древесины описывается законом Гука:

$$\begin{cases} s_{ij} = 2G\varepsilon_{ij};\\ P = -K\frac{\Delta V}{V}, \end{cases}$$
(1)

где s_{ij} – девиатор тензора напряжений; P – давление; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига; ε_{ij} – девиатор тензора деформаций; E – модуль упругости (модуль Юнга); ν – коэффициент Пуассона; $K = \frac{E}{2(1-2\nu)}$ – модуль

объемного сжатия; $\frac{\Delta V}{V}$ – объемная деформация.

В пластической области деформирования девиатор тензора напряжений подчиняется условию текучести Мизеса:

$$\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij} - \sigma_y^2 \le 0, \tag{2}$$

где σ_v – предел текучести материала.

Пластические свойства древесины описывались моделью Купера–Саймондса (Cowper–Symonds), учитывающей влияние скорости деформации:

$$\sigma_{y} = \sigma_{T} \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/p} \right)$$
(3)

где σ_т – статический предел текучести материала; ἐ – скорость деформации образца; *C*, *p* – параметры скорости деформации.

Для ударника и мерных стержней использовалась система уравнений (1).

В дальнейшем, проводились расчеты, в которых подбирались параметры скорости деформации *C*, *p* для каждой породы древесины в зависимости от угла вырезки.



Рис. 4. Расчетная конечно-элементная модель задач: 1 – ударник; 2 – нагружающий стержень; 3 – образец древесины; 4 – опорный стержень, V – скорость ударника

Результаты численного моделирования

Для изотропной упруго-пластической модели деформирования с изотропным упрочнением, которая учитывает влияние скорости деформации необходимо задать: модуль упругости E, коэффициент Пуассона v, статический предел текучести $\sigma_{\rm T}$ и параметры скорости деформации C, p.

В табл. 2 представлены механические свойства, которые принимались при численном моделировании. Следует отметить, что модуль упругости *E* определен по начальному линейному участку экспериментальных кривых деформирования (рис. 1–3). Остальные данные брались из различных источников [4–9]. Для определения параметров скорости деформации *C*, *p*, решалась система уравнений (3) для статического и динамического нагружения образца древесины.

Значения приведены в табл. 3-5.

На рис. 5–7 приведены диаграммы деформирования $\sigma \sim \epsilon$ и $\dot{\epsilon} \sim \epsilon$ образцов березы, сосны и осины с различными углами вырезки при температуре +20 °C с учетом параметров, учитывающих скорость деформирования *C*, *p*. В табл. 3–5 приведены результат численного моделирования со значением параметров *C*, *p*.

Таблица 2

	α, град	0	30	45	60	90			
	<i>Е</i> , МПа	4850	3650	810	450	400			
Береза	μ	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28			
	$σ_{_{T}}$, ΜΠα	81	35	23	17	11			
	<i>Е</i> , МПа	2833	1200	600	430	130			
Сосна	μ	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26			
	$σ_{_T}$, ΜΠα	45	15	8	5	4			
	<i>Е</i> , МПа	3180	670	475	400	300			
Осина	μ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25			
	$σ_{T}$, ΜΠα	41	15	10	8	6			

Механические свойства изотропной упруго-пластической модели

Таблица 3

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации C, p при температуре +20 °C. Береза

α, град	Эксперимент			Чи моде	ісленное лирован	ие	Параметры скорости деформирования		
	σ, МПа	З	έ, 1/c	σ, ΜΠα	З	έ, 1/c	<i>C</i> , 1/c	р	
0	160	0,10	1950	163,2	0,08	1941	1543	1,07	
30	120	0,10	2050	123,6	0,09	1724	600	1,12	
45	40	0,20	2700	41,4	0,23	2440	3557	1,09	
60	27	0,18	2650	30,2	0,21	2610	3301	0,77	
90	23	0,22	3100	25,7	0,24	2628	1889	5,32	

Таблица 4

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации *С, р* при температуре +20 °С. Сосна

α, град	Эксперимент			Числени	ное моделир	Параметры скорости деформирования		
	σ, МПа	3	έ, 1/c	σ, МПа	3	έ, 1/c	C, 1/c	р
0	85	0,15	2120	84,1	0,18	2167	7260	4,24
30	45	0,2	2750	46,3	0,22	2566	640	2,10
45	27	0,2	2750	28,7	0,26	2569	1141	1,04
60	13	0,09	750	14,2	0,07	568	82	4,71
90	8	0,22	3000	7,1	0,32	2545	5000	1,32

Таблица 5

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации *С*, *р* при температуре +20 °С. Осина

α, град	Эксперимент			ц МО,	Іисленноє делирован	е ние	Параметры скорости деформирования	
	σ, МПа	З	έ, 1/c	σ, ΜΠα	3	έ, 1/c	<i>C</i> , 1/c	р
0	105	0,11	1800	112,2	1895	1439	1439	0,94
30	27	0,22	3200	28,8	2540	17460	17460	7,60
45	17	0,07	1300	16,9	0,09	1255	1929	1,11
60	12	0,18	2500	10,2	0,23	1867	26950	1,81
90	9	0,24	3200	10,2	0,26	2122	25200	2,0



Рис. 5. Расчетные диаграммы деформирования образцов березы



Рис. 6. Расчетные диаграммы деформирования образцов сосны



Рис. 7. Расчетные диаграммы деформирования образцов осины

Заключение

В работе приведена изотропная упруго-пластическая модель деформирования березы, сосны и осины, учитывающая скоростное деформирование в диапазоне скоростей деформаций 600...3000 с⁻¹ при комнатной температуре +20 °С. Параметры модели подобраны для различных углов ориентации волокон по отношению к вектору удара (угла вырезки). Приведенная модель позволит более корректно учитывать поведение древесины при сжатии, что повысит точность и достоверность результатов расчетов и численного моделирования динамического деформирования элементов конструкций, содержащих древесину. Численные результаты хорошо согласуются с результатами эксперимента [1]. Относительная погрешность по пределу текучести в зависимости от угла вырезки для образцов березы составляет не более 12 %, сосны – не более 11 %, осины не более 15 %. Причем погрешность возрастает с увеличением угла вырезки, которую можно объяснить расщеплением, расслоением реальных образцов при сжатии, что не учитывается в численной модели деформирования.

Литература

1. Брагов А. М., Ломунов А. К. и др. Влияние скорости деформации, температуры и угла вырезки на механические свойства некоторых пород древесины // IX Харитоновские чтения. 2007. С. 329–333.

2. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц // XV Супервычисления и математическое моделирование. 2014. С. 241–246.

3. Брагов А. М., Ломунов А. К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций. 1995. С. 127–136.

4. Новиков С. А. Демпфирующие свойства секвойи, березы, сосны и осины при ударном нагружении // Прочность материалов при динамическом нагружении. № 7. 2003. С. 85–97.

5. Митинский А. Н. Упругие постоянные древесины // Труды лесотехнической академии им. С. М. Кирова. № 63, 1970.

6. Брагов А. М. и др. Научно-технический отчет по теме: Разработка программного обеспечения и математическое моделирование деформирования и разрушения спецконструкций при квазистатических и динамических нагрузках – Экспериментальное изучение динамических свойств сосны, березы и осины с различным направлением вырезки образцов при пониженной температуре // НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобочевского. Н. Новгород, 1998.

7. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Ленинград: «Машиностроение» ленинградское отделение, 1980.

8. Комар А. Г. Строительные материалы и изделия. М: Высшая школа, 1983.

9. Iraola B., Cabrero J.M. An algorithm to model wood accounting for diferrent tension and compression elastic and failure behaviors, Eng. Struct. 2016. № 117. P. 332–343.

КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ СТРАУС-2, ИЛТИ-1 №1, ИЛТИ-1 № 2

А. В. Осадчих, А. Д. Воронова, С. В. Гладков, А. Н. Ляднов, А. Н. Сусуйкин, Д. А. Хлопков

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

В настоящее время радиационно-облучательный комплекс «Пульсар» является одним из уникальных центров в мире для проведения исследований раздельного и комбинированного воздействия импульсов тормозного и гамма-нейтронного излучений. В состав ОК «Пульсар» входят: линейный индукционный ускоритель ЛИУ-30, два реактора на быстрых нейтронах и установки дооснащения, том числе ускорители СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1 и № 2 [1, 2] (см. рис.1).





Рис. 1. Общий вид ускорителей: а – СТРАУС-2, б – ИЛТИ-1 № 1

В 2013 году завершилась модернизация автоматизированной системы управления и контроля (АСУК) ускорителя ЛИУ-30. Принятые технические решения, разработанные электронные компоненты и блоки доказали свою эффективность и высокую степень надежности в управлении ускорителем при его эксплуатации в течение 4 лет. На основе этих решений были разработаны более совершенные АСУК ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1 и № 2. Важно отметить унификацию электронных компонентов, общего подхода к программированию этих двух АСУК, позволяющую оперативно проводить ремонт и вносить изменения в программное обеспечение (ПО) при необходимости.

АСУК представляет собой комплекс технических средств и программного обеспечения, предназначенный для обеспечения зарядки емкостных накопителей и запуска стартового генератора по командам с пульта управления при выполнении работ по подготовке и проведению рабочего пуска в соответствии с заданием на проведение эксперимента. Далее в докладе подробно рассмотрена АСУК ускорителя СТРАУС-2, потому как АСУК ускорителей ИЛТИ-1 № 1 и № 2 идентична ей, лишь использует свободные каналы в электронных блоках АСУК ускорителя СТРАУС-2 и имеет свой блок включения питания стойки - блочный импульсный наносекундный генератор (БИНГ).

Объектами автоматизации являются система статической зарядки (выпрямительно-зарядные устройства (ВЗУ)), система синхронизации, технологические системы [3].

На рис. 2 представлены ВЗУ системы статической зарядки емкостных накопителей генераторов импульсного напряжения амплитудой до 600 кВ ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1 и № 2.



Рис. 2. Выпрямительно-зарядные устройства ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1

Схема структурная АСУК ускорителя СТРАУС-2 приведена на рис. 3.

Составные части АСУК и их функциональное назначение:

 – блок фильтров (преобразует сигналы свидетелей замыкания-размыкания контактов коммутаторов, концевых выключателей и т. д.);

 – блок запуска (формирует сигнал запуска программируемого генератора сигналов (ПГС));

– блок питания (выдает напряжения +24, +15, -15 В для питания электронных блоков АСУК);

 – блок согласования (генерирует управляющее напряжения +24В для включения исполнительных элементов АСУК);

– блок управления зарядкой (регулирует выходное напряжение регулятора ВЗУ в соответствии с заданной программой зарядки емкостных накопителей);

 – блок усилителей (преобразует и усиливает входной сигнал с датчиков для последующей обработки в модуле сбора данных); – панель блокировок (содержит релейную автономную схему ограничения доступа в подконтрольных помещениях);

 – модуль сбора данных фирмы National Instruments (NI) (производит оцифровку сигналов с блока усилителей, выдает опорное напряжение на блок управления зарядкой);

 – ЭВМ АСУК с платами входных и выходных регистров фирмы ADLink (обеспечивает согласованную работу узлов ускорителя в соответствии с утвержденным алгоритмом, отображает оперативную информацию на терминале оператора);

 – блок включения питания стойки БИНГ (подает сетевое напряжение на генераторы БИНГ);

– блок ручного управления (осуществляет допуск к работе АСУК, ручную подачу команд «ПУСК» и «СБРОС»);

 программируемый генератор сигналов (выдает сигналы запуска систем ускорителя, аппаратуры регистрации).



Рис. 3. Структурная схема АСУК СТРАУС-2: ГИН – генератор импульсного напряжения; ПГС – программируемый генератор сигнала; БИНГ – блочный импульсный наносекундный генератор

Блоки и устройства АСУК размещены в девятнадцатидюймовой стойке управления фирмы Cabeus. Внешний вид пультовой установки дооснащения представлен на рис. 4. Отличительная особенность АСУК в том, что блоки управления вынесены из экспериментальных залов и размещены в пультовых помещениях для исключения воздействия мощного радиационного излучения на радиоэлементы. Для подавления электромагнитных помех используются переходные окна с блокам и емкостных фильтров (см. рис. 4).



Рис. 4. Стойка управления АСУК: 1 – стойка управления САВЕUS, 2 – ПГС, 3 – выдвижная панель с электронными блоками АСУК, 4 – ЭВМ, 5 – источник бесперебойного питания, 6 – переходное окно фильтров, 7 – громкоговоритель

Выдвижная панель с блоками управления АСУК (см. рис. 5) позволяет за счет конструкции и размещения компонентов оперативно производить настройку, поиск неисправностей, ремонт. Все блоки (за исключением модуля сбора данных) разработаны и изготовлены группой эксплуатации АСУК электрофизических установок облучательного комплекса «Пульсар».



Рис. 5. Выдвижная панель с блоками управления АСУК

На рис. 6 отображено рабочее место оператора АСУК. Оно состоит из терминала ЭВМ АСУК (монитор, клавиатура, манипулятор типа «Мышь») и ручного пульта управления. На мониторе отображена мнемосхема программы управления ходом зарядки ускорителя СТРАУС-2.



Рис. 6. Рабочее место оператора АСУК

На рис. 7 представлен ручной пульт управления (РПУ). На нем расположены кнопки ручного ПУСКА и СБРОСА, а также замок с ключом коммутации питания стойки управления АСУК. С помощью РПУ реализуются следующие функции:

 – осуществление допуска к работе на установках, аварийное отключение АСУК поворотом специального ключа;

 возможность вручную подать команды «ПУСК» и «СБРОС» нажатием на соответствующую кнопку.



Рис. 7. Ручной пульт управления

На рис. 8 представлен ПГС.

ПГС предназначен для формирования с заданной временной задержкой пусковых сигналов устройств ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 №1 и №2, аппаратуры регистрации.

ПГС может функционировать как в автономном, так и в комплексном режиме. Автономный режим с возможностью ручного пуска применяется для проверки конкретного канала и способности запуска удаленного устройства – потребителя сигнала. В комплексном режиме ПГС получает внешний пусковой сигнал и формирует на выходе каждого выбранного канала сигнал запуска.



Рис. 8. Внешний вид ПГС: 1...8 – выходные блоки усилителей-формирователей, 9 – блок таймера, 10 – каркас

Необходимые временные настройки таймера ПГС производятся с помощью программируемого пульта управления на мониторе ЭВМ АСУК.

ПГС обеспечивает по каждому каналу:

 – на нагрузке 75 Ом однократные импульсы положительной полярности длительностью не менее 2 мкс, амплитудой около 300 В, с длительностью фронта 15–30 нс;

 – диапазон задержек между импульсом запуска и выходным импульсом от 25 нс до 100 мин с интервалом от 5 нс;

- защиту от короткого замыкания в нагрузке;

- блокировку по входу от повторного импульса;

– индикацию срабатывания канала запуска.

Число каналов ПГС – до 16.

Программное обеспечение АСУК

ПО является составной частью АСУК ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 №1 и №2. Оно создано в графической среде программирования LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) фирмы National Instruments. Аппаратно-программный комплекс LabVIEW позволяет выполнять функции множества измерительных и управляющих приборов, производить обработку поступающей информации [4].

Для АСУК ускорителя СТРАУС-2 создана программа, в которой реализовано 4 режима работы – «Конфигурация», «Зарядка», «Имитация зарядки», «График». В модуле «Конфигурация» задаются параметры зарядных напряжений ВЗУ, осуществляется выбор ГИН для участия в эксперименте. В модуле «Зарядка» представлена мнемосхема процесса зарядки устройств ускорителя СТРАУС-2 (см. рис. 9). Модуль «Имитация зарядки» позволяет загружать архивные данные процесса заряда ускорителя с отображением их на мнемосхеме. Данный режим используется при диагностике и отладке работы ВЗУ. Модуль «График» позволяет просматривать из архива графики изменения во времени зарядных напряжений ВЗУ, ГИН. Для ускорителей ИЛТИ-1 № 1 и № 2 создано аналогичное ПО.



Рис. 9. Мнемосхема модуля «Зарядка» АСУК СТРАУС-2

Дальнейшим развитием ПО АСУК ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1 и № 2 будет интеграция в ПО центрального пульта управления АСУК ускорителя ЛИУ-30. Это позволит производить зарядку ускорителей в комплексном режиме.

В результате опытной эксплуатации АСУК ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1 и № 2 была подтверждена правильность выбранных технических решений. Надежная работа АСУК электрофизических установок облучательного комплекса «Пульсар» в полной мере обеспечивает успешное проведение облучательных экспериментов.

Литература

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко А. В. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергии: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011. С. 165–191.

2. Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Гришин А. В., Завьялов Н. В., Мысков Г. А., Назаренко С. Т. Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Вып/ 20. 2015. С. 48–55.

3. Босамыкин В. С., Гордеев В. С., Павловский А. И. и др. Импульсный ускоритель электронов СТРАУС-2 // Физика и техника высоких плотностей электромагнитной энергии. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2003. С. 69–102.

4. Тревис Дж. LabVIEW для всех // Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект. 2013. С. 544.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МАЛОГАБАРИТНОЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

<u>М. Н. Письмаров</u>, А. С. Анашкин, А. А. Куфтин, Д. В. Ларичев

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

Развитие военной техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей современных машин и механизмов, приводит к значительному возрастанию вредных вибраций, что повышает опасность разрушения деталей, когда колебания системы проходят через резонанс вследствие усталости. Статистика показывает, что около 80 % поломок и аварий в приборостроении являются следствием резонансных колебаний.

Одним из основных требований при разработке малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА) является обеспечение минимальных массогабаритных характеристик. Учитывая это, наиболее оптимальной конструкцией МБА будет та, которая обеспечивает, кроме всего прочего, защиту от механических воздействий.

Разработка устройств защиты от вибрационных воздействий МБА, сочетающих высокую дем пфирующую способность с повышенными механическими и хорошими технологическими свойствами, является сейчас одной из самых актуальных задач.

Решение данной задачи возможно при применении в конструкции корпусов или других несущих элементов МБА сплавов высокого демпфирования (СВД). Их использование становится одним из основных способов эффективного снижения вредных вибраций. Благодаря высокой демпфирующей способности материала, свободные колебания в изготовленных из него деталях быстро затухают, значительно снижаются амплитуды вынужденных резонансных колебаний, резко падают напряжения от ударного воздействия.

В [1] В. С. Постниковым предложено все материалы разделить на три класса по индексу демпфирования (рис. 1):

 менее 1 – низкодем пфирующие материалы (например, деформируемые алюминиевые сплавы);

 – от 1 до 10 – среднедемпфирующие материалы (хромистая сталь типа 1Х13, 2Х13 и т.д. и сплавы на основе спеченного порошка алюминия типа САП);

– от 10 до 100 – высокодемпфирующие материалы (магний и его сплавы с цирконием, кремнием и марганцем; сплавы системы Си – Мп, никель; сплавы Со – Ni; серый чугун; сплавы на основе соединений NiTi (нитинолы); сплавы на основе железа (Fe-Cr-Al)).

В основном механизм высокого демпфирования металлов и сплавов обусловлен внутренним (структурным) рассеянием энергии механических колебаний в материале и контактным рассеянием, благодаря наличию в таких материалах сложных слоистых систем, состоящих из металла и высокомолекулярных соединений [1].



Рис. 1. Индекс демпфирования металлов и сплавов

Большая часть материалов (металлов и сплавов) с высоким индексом демпфирования (магний и его сплавы; сплавы марганца; сплавы системы Cu – Mn, никель; сплавы Co – Ni) являются достаточно экзотическими, с высокой стоимостью, плохой обрабатываемостью и низкими прочностными свойствами.

Стоимость материалов и их прочностные свойства являются определяющими при выборе СВД для применения в составе МБА. Так как СВД в составе МБА предполагается применять в несущих элементах конструкций приборов (корпуса, основания), то материал должен обладать низкой стоимостью, соответствующей технологичностью и конструкционной прочностью не хуже деформируемых алюминиевых сплавов (Д16, В95, АМг6).

Этому требованию отвечают такие материалы как: серый чугун СЧ20 ГОСТ 1412-85, стали 20ХНЗА ГОСТ 4543-71, 40Х ГОСТ 4543-71, 30Х13 ТУ 14-1-3957-85, 30ХГСА ГОСТ 4543-71, сплав 12Х18Н10Т ГОСТ5632-72.

В работе проведены исследования на определение демпфирующих свойств образцов металлических пластин (в количестве 4 шт. каждая, рис. 2) из названных выше материалов по методике и на установке, разработанных в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (рис. 3) [2].



Рис. 2. Металлическая пластина

В ходе исследований установлено, что с увеличением амплитуды механического воздействия демпфирующие свойства материалов увеличиваются. Отмечено, что на результаты испытаний влияет плоскостность граней кронштейна и момент затяжки крепежных элементов. Кронштейн для различных образцов пластин отличается. Также для предотвращения «свободного хода» образцов пластин следует обеспечить их закрепление как можно ближе к краю грани, на которой они размещаются.



Рис. 3. Размещение пластины на установке

Коэффициенты механических потерь металлических образцов пластин представлены на рис. 4.



Рис. 4. Величина коэффициента механических потерь металлических пластин при механическом воздействии с амплитудой *A* = 2,2 м/с²

Наибольшими демпфирующими свойствами обладает материал серый чугун СЧ20 ГОСТ 1412-85 с коэффициентом механических потерь 4,77 %.

При этом широкое использование серого чугуна в МБА ограничивает то, что его основным компонентом является железо. Как следствие, детали из него имеют большую массу, что неприемлемо для МБА. Поэтому, несмотря на то, что применение серого чугуна для изготовления корпусов (как основной несущей детали аппаратуры) наиболее эффективно для рассеивания энергии механических воздействий, применение его для МБА нецелесообразно.

Необходимо проведение исследований для определения оптимальных элементов конструкции (крепежные втулки основания, втулки для крепления функциональных модулей (ФМ)), не увеличивающих (критично) массу МБА и снижающих при этом динамичность конструкции (рис. 5 и 6).





Рис.6. Расположение втулок (показана нижняя часть макета)

Перспективным также является исследование слоистых и многослойных материалов, которые можно отнести к разновидности композиционных. Электролитические покрытия оловом, хромом, серебром, кадмием и другими металлами оказывают существенное воздействие на рассеяние энергии колебаний деталью конструкции, на которую эти покрытия нанесены. Увеличение демпфирования в результате нанесения гальванических покрытий объясняется природой электролитического покрытия и потерями в пограничном слое между покрытием и основой [3].

Максимальный эффект роста демпфирующих характеристик обнаружен А. П. Васильевой и Ю. К. Фавстовым [4] при хромировании – для сталей 12Х13 и 30Х13 декремент колебаний возрос в 2 раза, для стали 30ХМА – в 6–10 раз. Для пружинной бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 максимальное демпфирующее воздействие оказывает гальваническое покрытие палладия по подслою серебра. При этом увеличение толщины и старение покрытия всегда повышает его демпфирующее действие. Дальнейшие перспективы в выявлении возможности применения СВД в конструкциях МБА разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» представляются в исследовании «пакетов» склеенных металлических пластин (рис. 7), нанесении на пластины покрытий Хим.Н15.тв и Х9.тв, исследовании сплавов на основе NiTi, а также изготовлении и внедрении крепежных втулок из материала СЧ 20 ГОСТ 1412-85.



Рис. 7. Металлический пакет: 1 и 2 – материалы согласно спецификации

Литература

1. Головин С. А., Пушкар А., Левин Д. М. У пругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987.

2. Пат. 2628737 РФ. Установка для определения динамических характеристик низкомодульных полимерных материалов / А. В. Иванов, В. Н. Савин, А. А. Куфтин, С. И. Смирнова, С. Д. Литвинов, В. В. Скрипка. // Приоритет. 2017.

3. Фавствов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахштадт А. Г.; под ред. Рахштадта А. Г.: Металловедение высокодемпфирующих сплавов. М.: Металлургия, 1980.

4. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник – Киев: Наукова думка, 1971.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОЕВ ЦИФРОВЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Н. Ф. Асмолова, И. Ю. Забавичев, <u>А. А. Потехин</u>, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

В соответствии с дорожной картой развития приборов и систем, представленной институтом инженеров электротехники и электроники [1], одним из приоритетных направлений развития современной электроники является уменьшение топологических размеров элементарных ячеек цифровых микросхем.

При этом усиливается влияние структурных дефектов, производимых проникающим излучением, так как характерный диаметр области разупорядочения становится сопоставимым с размером рабочей области полупроводникового элемента хотя бы по одному направлению [2–6].

Известно, что при воздействии нейтронного, протонного, электронного и гамма-излучений образуются комплексы дефектов, отжиг которых происходит при различной температуре. Источниками низкоинтенсивных проникающих излучений являются как космическое пространство, так и ядерные источники энергии на борту космических аппаратов. Возникающие при этом радиационные эффекты можно получить с использованием исследовательских ядерных реакторов. Такой подход позволяет смоделировать поведение микросхемы в условиях воздействия низкоинтенсивных проникающих излучений космического пространства и значительно снижает конечную стоимость готового продукта.

Достоверная оценка радиационной стойкости (как расчетная, так и экспериментальная) часто осложнена явлениями перемежающихся отказов и «окон прозрачности» отказов цифровых микросхем, в зависимости от интенсивности и суммарного значения воздействия проникающих излучений. Существует несколько теоретических интерпретаций указанных явлений, но ни одна из них в настоящее время не является доминирующей.

В связи с вышеизложенным, практический интерес представляет разработка феноменологической модели, опирающейся на базовые физические представления радиационной физики полупроводниковых приборов, и позволяющей адекватно интерпретировать экспериментальные данные, получаемые в ходе проведения облучательного эксперимента.

Для цифровой аппаратуры основным критерием работоспособности является вероятность сбоев и отказов логических ячеек, ввиду того, что воздействие проникающих излучений носит стохастический характер. Следует отметить, что при частичном перекрытии ячейки цифровой микросхемы комплексом радиационных дефектов она может сохранять свою работоспособность. Таким образом, отказ ячейки микросхемы обуславливается не только образованием комплекса дефектов, но и его положением в самой ячейке. Из литературы известно, что при образовании комплексов дефектов происходит увеличение сопротивления полупроводниковых материалов [7]. В условиях сохранения величины протекающего через ячейки тока, будет увеличиваться рассеиваемая мощность, а как следствие, и температура кристалла. В результате этого происходит частичный отжиг дефектов и снижение сопротивления с частичным восстановлением их структуры. Таким образом, частота сбоев может являться немонотонной функцией времени облучения микросхемы.

Методика эксперимента

В соответствии с нормативными документами [8, 9] необратимые изменения параметров изделий микроэлектроники при воздействии электронов и протонов моделируют последовательным облучением аппаратуры гамма- и нейтронными излучениями. При таком моделировании требования к радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов в виде потоков электронов и протонов космического пространства и их спектрально-энергетических характеристик пересчитывают в дозы, поглощенные в процессах ионизации и структурных повреждений. Расчет поглощенных доз осуществляют по материалу активных областей критичных электрорадиоизделий. Таким образом, получают требования к радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, выраженные в поглощенных дозах.

Затем для конкретных моделирующих установок (с их спектрально-энергетическими характеристиками) вычисляют поток нейтронов (моделирует структурные повреждения воздействия протонов) и экспозиционную дозу гамма-излучения. При их воздействии на радиоэлектронную аппаратуру поглощаются ионизационная и структурная дозы, численно равные указанным выше соответствующим поглощенным дозам от электронного и протонного излучений. Экспозиционная доза должна определяться с учетом ионизирующего действия нейтронов и вклада сопутствующего гамма-излучения при испытаниях на ядерном реакторе. Эксперимент состоял в подаче цифровых импульсов определенной амплитуды и частоты на цифровой усилитель, подвергающийся воздействию низкоинтенсивных проникающих излучений. При помощи автоматизированного комплекса проводилось определение параметров усиленного сигнала по типу норма/не норма. В результате на выходе получалась бинарная последовательность отсчетов. При первичной оценке необработанных данных получены графики, представленные на рис. 1.



Рис. 1. Вид представления необработанных данных эксперимента

Как видно из графиков, они имеют достаточно низкую информативность ввиду трудности интерпретации полученных данных. Поэтому возникла задача обработки этих данных.

Результаты и их обсуждение

Достоверность оценки получаемых результатов при усреднении полученных данных методом скользящего окна определяется доверительной вероятностью среднего (частота сбоев), получаемого при усреднении. Результатом эксперимента стала бинарная дискретная функция (норма/не норма).

При больших значениях выборок, используемых в окне, неоднородность распределения сбоев в ходе эксперимента искажает полученный результат. Как видно из графика на рис. 2, функция достаточно изрезана и не дает представление о характере эксперимента. В обратном случае, при большом числе усредняемых отсчетов, возможен и обратный эффект – сглаживание характерных размеров неоднородностей, что ведет к неправильной трактовке эксперимента.

Поэтому одной из задач данной работы являлось нахождение параметров усреднения, позволяющих получить качественную картину эксперимента без потери основных зависимостей.

Доверительная вероятность определяется следующим образом [10]:

$$P\left(\tilde{a} - \varepsilon < a < \tilde{a} + \varepsilon\right) = \beta, \tag{1}$$



Рис. 2. Сравнение графиков с оптимальным и избыточным размером окон усреднения для образца № 1

где a – истинное значение параметра, \tilde{a} – полученная несмещенная оценка параметра a. Для оценки доверительного интервала, в который с заданной доверительной вероятностью попадает выбранная величина, необходимо определить тип полученного распределения. В соответствии с центральной предельной теоремой, при усреднении большого количества данных, распределение можно считать нормальным. Для обработки результатов данного эксперимента была выбрана доверительная вероятность, равная 99,9 %. Для его вычисления необходимо рассчитать оценку среднего и дисперсии внутри окна, а также среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i, \qquad (2)$$

$$\widetilde{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \widetilde{m} \right)^2, \qquad (3)$$

$$\sigma_{\widetilde{m}} = \sqrt{\frac{\widetilde{D}}{n}},\tag{4}$$

где X_i – измеренная *i*-я величина, n – число отсчетов внутри окна усреднения.

При этом, доверительный интервал для заданного окна и типа случайного распределения внутри окна можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{\beta} = \sigma_{\widetilde{m}} \arg \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right). \tag{5}$$

При этом для обратного интерполирования функции Лапласа значение, соответствующее вероятности 99,73 % составляет 3.

Исходя из методики, приведенной выше, вычислено значение доверительного интервала для параметров окна усреднения, используемых в дальнейшем, см. рис. 3.

Стоит отметить, что значение доверительного интервала становится отличным от 0 тогда, когда вероятность появления ошибок отлична от 0. При подобных значениях доверительной вероятности можно считать полученный доверительный интервал достоверным значением измеряемой величины.

Частота сбоев и интенсивность отказов, прогнозируемые для данного вида цифровых усилителей, представлены на рис. 4.

Предполагается, что такое аномальное поведение микросхем, рис.5, обусловлено проявлением двух конкурирующих эффектов – накоплением дефектов при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений с материалом активной области прибора, а также диффузией и частичным отжигом дефектов при разогреве рабочей области в момент прохождения импульса тока. Стоит отметить, что не все дефекты подвержены влиянию низкотемпературного отжига. В случае, если эти образования имеют достаточно большой характерный размер и стабильную структуру, то при повышении температуры они могут не отжигаться. Предполагается, что именно накопление дефектов, не подверженных подобному типу отжига и привело к катастрофическому отказу в конце описываемого эксперимента для всех исследуемых образцов.



Рис. 3. Величина доверительного интервала в процентах для каждого усредненного значения для трех испытуемых образцов


Рис. 4. Частота сбоев и частота отказов (прогнозируемые): экспериментальные обработанные данные, расчетная ожидаемая частота отказов



Рис. 5. Результаты эксперимента, усредненные методом скользящего окна с оптимальными параметрами усреднения (800 отсчетов) для 3 испытуемых образцов

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИЯРФ ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» за проведение облучательных экспериментов в рамках совместных исследований.

Литература

1. International roadmap for devices and systems: 2017 edition. More Moore.

2. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 71–75.

3. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А., Волкова Е. В., Павельев Д. Г. Высокочастотное

детектирование процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1585–1592.

4. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Влияние случайных неоднородностей в пространственном распределении кластеров радиационных дефектов на перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при нейтронном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706–1712.

5. Забавичев И. Ю., Оболенская Е. С., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Транспорт горячих носителей заряда в Si, GaAs, InGaAs и GaN субмикронных полупроводниковых структурах с нанометровыми кластерами радиационных дефектов // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489–1492. 6. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Деградация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520–1524.

7. Зеегер С. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.

8. ОСТ 134-1034-2003. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов.

Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

9. РД В 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники, электротехнические изделия военного назначения. Рациональный состав и последовательность испытаний на радиационную стойкость.

10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ КОРПУСОВ С КРЫШКАМИ ИЗ СОСТАВА ПРИБОРОВ

А. В. Проскуряков, И. М. Чертов

ФГУП «ПСЗ», г. Трехгорный Челябинской обл.

Введение

В рамках проводимых по техническому заданию опытно-конструкторских работ на ФГУП «ПСЗ» была отработана технология лазерной сварки корпусов и крышек из состав, а сложных электронных приборов. Конструкция сварных неразборных корпусов была впервые применена при разработке приборов и в изготовлении. В результате успешного применения технологии лазерной сварки корпусов и крышек, аналогичная конструкция корпусов и крышек и технология была внедрена в широкий спектр электронных приборов.

Содержание работ

Для отработки технологии лазерной сварки были изготовлены 6 комплектов деталей: корпус и крышка (внешний вид представлен на рис. 1) из алюминиевого сплава АМг6 ГОСТ 4784-97 [1].



Рис.1. Внешний вид корпуса и крышки

С изготовленными деталями проведены следующие работы:

 – на комплектах № 1, 2 в цехе была выполнена сварка с использованием установки лазерной сварки ЛТА4-1;

 – на комплекте № 3 в цехе была выполнена сварка с использованием автоматического комплекса аргонно-дуговой сварки.

Анализ сварного соединения показал:

 на комплектах № 1, 2 образовались трещины вдоль сварного соединения;

 на комплекте № 3 имеются нарушения геометрических размеров и гальванического покрытия.

Предполагаемая причина отклонений - возникающая значительная разница между температурой в точке сварки и смежной областью шва, вызванная отбором тепла посредством теплоотдачи в окружающую среду и распределением непосредственно по корпусу и крышке за счет теплопроводности алюминиевого сплава. Из-за температурных изменений в структуре металла при нагревании и охлаждении происходит деформация материала в месте сварного соединения, что приводит к растрескиванию сварного шва.

С целью исключения появления трещин рекомендуется [2]:

 проводить сварочные работы при постоянном равномерном прогреве металла и дальнейшем постепенном охлаждении. Данный метод не применим в рассматриваемом случае из-за конструкционных и эксплуатационных особенностей приборов;

 проводить механическую зачистку области сварного шва либо химическое травление. Химическое травление не применимо из-за особенностей технологии сборки и сроков подготовки к сварочным работам;

 исключать зазоры между сопрягаемыми деталями.

По результатам выполненных работ и проведенного анализа были изменены конструкция и технология изготовления, проведена корректировка конструкторской документации (КД) на детали корпус и крышка в результате чего:

– исключен зазор между корпусом и крышкой;

 введен конструктивный элемент в виде канавки, вы полненной по периметру в непосредственной близости от кромок свариваемых деталей (внешний вид канавок представлен на рис. 2), для снятия внутренних напряжений сварного соединения;



Рис. 2. Внешний вид канавок

 введено требование о недопущении притуплении острой кромки в местах сварного соединения;

 исключено гальваническое покрытие в местах сварного соединения.

Для дальнейшей отработки технологии комплекты № 4, 5, 6 были доработаны по измененной КД. На образцах, имитирующих соединение корпуса с крышкой, подобраны режимы для лазерной установки ЛТА4-1: энергия импульса – $8^{+0.5}$ Дж, расфокусировка – 3 дел., форма импульса – 0, длительность импульса – 6 мс, частота – 3 Гц.

Непосредственно перед сваркой, дополнительно, выполнены следующие операции:

 механическая зачистка мест сварного соединения для удаления окисной пленки;

 – детали установлены в приспособление, которое обеспечило плотное прилегание по всей плоскости сварного соединения.

После перечисленной подготовки была выполнена сварка корпуса с крышкой комплектов № 4, 5, №6. Контроль сварного соединение дал положительный результат. Также образцы были испытаны на воздействие механического удара одиночного действия в 3-х направлениях (2000 g) – результат положительный.

Выводы

В результате отработки технологии лазерной сварки на ФГУП «ПСЗ» решено:

 уменьшить утяжку материала в месте сварного соединения за счет введения в конструкцию корпуса и крышки канавок (внешний вид канавок представлен на рис. 2). Канавки уменьшают площадь сечения через которое происходит отвод тепла из зоны сварного шва и придают области возле шва пластические свойства;

 непосредственно перед сварочной операцией введена механическая зачистка кромок, смежных с местом сварки, для удаления окисной пленки;

 – для исключения зазоров между корпусом и крышкой принято решение не притуплять кромки деталей и предварительно стягивать детали между собой;

 подобран оптимальный режим работы лазерной установки.

Освоенная технология лазерной сварки позволяет изготавливать на ФГУП «ПСЗ», соответствующие требованиям КД, новые приборы, конструкция которых предусматривает сварной неразборный корпус.

Литература

1. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введен 08.12.1998. М.: Межгосударственный стандарт: ИПК Издательство стандартов, 1999. 11 с.

2. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М: Машиностроение, 1972.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

А. А. Аушев, А. С. Вихорев, Т. В. Коршунова, Р. В. Порубов, <u>С. М. Прохоров</u>, А. В. Царева, В. В. Шишлов, В. Л. Юрьев

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

Введение

В экспериментах по лазерному термоядерному синтезу необходимы полимерные оболочки большого диаметра для наполнения топливом со стенкой толщиной до 200 мкм [1]. Такие параметры невозможно обеспечить при изготовлении микросфер методами вспенивания в печи падения и микрокапсулирования. Получаемые оболочки имеют толщину стенки 10-25 мкм. Для наращивания толщины стенки полимерных оболочек применяется метод плазмохимического осаждения СН-полимера [2]. Слои полимера, осажденные из плазмы газового разряда, удовлетворяют жестким требованиям к форме, разнотолщинности стенки и шероховатости поверхности мишеней для исследования лазерных термоядерных процессов [2, 3]. Вариация соотношения между исходными реагентами и мощностью, вкладываемой в газовый разряд, позволяет изменять механические свойства и термическую устойчивость получаемого покрытия. Метод осаждения СН-полимера в плазме газового разряда позволяет относительно легко вводить легирующие примеси в растущие пленки [4].

В работе исследуется способ нанесения СН- и СD-полимерных пленок из плазмы емкостного низкочастотного разряда, структура получаемого полимера, его состав и свойства поверхности. В качестве исходных реагентов при получении СН-пленки использовали бензол (C_6H_6) и водород (H_2), для СD-пленки – дейтерированный бензол-D6 (C_6D_6) и дейтерий D₂.

Методика эксперимента

Процесс нанесения пленки осуществлялся на лабораторной плазмохимической установке типа, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.

Расход плазмообразующего газа (H_2/D_2) устанавливали с помощью регулятора расхода газа в интервале 0,3–0,4 л/ч. Пары мономера (C_6H_6/C_6D_6) дозировались из термостатируемой ампулы через игольчатый натекатель с плавной регулировкой. Реакционная камера представляет собой кварцевый цилиндр $100 \times 50 \times 4$, размещенный между двумя параллельными фланцами-электродами из нержавеющей стали. Внутри камеры помещалась подложка параллельно электродам. После откачки камеры производили напуск смеси водорода и паров органического мономера в соотношении 2:1 в камеру до давления 100–200 Па и поджигали тлеющий разряд на частоте около 20 кГц.



Рис.1. Схема установки плазмохимической полимеризации: 1 – баллон с плазмообразующим газом, 2 – ампула с мономером, 3 – источник переменного напряжения, 4 – реакционная камера, 5 – подложка, 6 – азотная ловушка, 7 – диффузионный насос, 8 – форвакуумный насос

Скорость роста полимерной пленки напрямую зависит от концентрации реагентов в рабочей камере, однако при критическом пересыщении происходит образование бимодальных структур (появлению конденсированной фазы в виде пленки и порошка). Экспериментально был установлен оптимальный расход бензола – 0,2 г/ч, при котором основная часть осаждаемого вещества напыляется в виде пленки со скоростью 0,5 мкм/ч.

Полученные образцы полимеров представляют собой желто-коричневые пленки, обладающие высокой термостойкостью и не растворимые в органических растворителях и кислотах.

Напыление проводили на чистые стеклянные подложки. с нанесенным слоем поливинилового спирта (для получения свободной пленки) и полистирол. Толщину напыляемого покрытия определяли с помощью интерферометра МИИ-4. Для исследования структуры полученных полимеров методом ИК-спектроскопии в качестве подложек использовали полированные кристаллы NaCl. Измерения спектров пропускания проводили на инфракрасном Фурье-спектрометре в диапазоне длин волн от 400 до 7500 см $^{-1}$ с разрешением 5 нм. Отнесение линий в спектрах проводили согласно [5, 6]. Морфологию поверхности пленок изучали методом атомно-силовой микроскопии с помощью зондового микроскопа Solver Next, работающего в полуконтактном режиме. Макросостав пленки определяли методом термомасс-спектрометрии на автоматизированном газоаналитическом комплексе АГКШ01 на основе квадрупольного массспектрометра КМС-01/250. Комплекс дополнен пиролитической приставкой, позволяющей проводить анализ газовой фазы, выделяющейся при нагревании материала вплоть до температуры 1000 °С. Рентгенофотоэлектронные спектры, микрофотографии поверхности и среза пленки получали на сканирующем электронном микроскопе MIRA\\ LMU.

Результаты и обсуждение

Спектр пропускания СН-полимера, полученного из бензола методом плазмохимического напыления, приведен на рис. 2.

В спектре присутствуют интенсивные полосы, характерные для валентных (2935 и 2871 см⁻¹) и деформационных (1453 и 1376 см⁻¹) колебаний алифатических связей СН₂ и СН₃, что свидетельствует о раскрытии бензольного кольца. Однако полосы 3025 и 1597 см⁻¹ указывает на наличие ароматического кольца в структуре полимера, также полосы при 757 и 696 см⁻¹ характеризуют замещенное бензольное кольцо. Полоса при 3377 см⁻¹ характерна для связи О-Н в воде, 1688 см⁻¹ свидетельствует о наличии связи С=О.

Исходя из данных, полученных при анализе спектра пропускания полимерных пленок, а именно наличия линий, характеризующих и алифатические, и ароматические связи, можно сделать вывод о том, что в результате реакций, происходящих в плазмохимической камере, молекула мономера раскрывается, образуя линейные фрагменты, которые формируют слои полимера на подложке. Присутствие ароматической структуры в образцах связано с включением мономеров и олигомерных молекул в полимерную структуру в процессе полимеризации.

Дейтерированный полимер, осажденный из плазмы, (рис. 3) имеет схожую структуру. В ИК-спектре отображаются гармонические колебания аналогичных структурных фрагментов и групп атомов, а сдвиг частот колебаний согласуется с правилом, согласно которому при замене одного или нескольких атомов молекулы атомами более тяжелых изотопов частоты нормальных колебаний уменьшаются [6].



Рис.2. Спектр пропускания для СН-полимера, полученного методом плазмохимической полимеризации бензола



Рис. 3. Спектры пропускания для CD-полимера, полученного методом плазмохимической полимеризации дейтерированного бензола

Изображения излома полимерной пленки, полученной за два цикла осаждения на стеклянной подложке, показаны на рис. 4. Пленка имеет плотную структуру без пор, на поверхности видны микронеровности в виде бугорков.



Рис. 4. Электронные микрофотографии излома полимерной пленки

Элементный состав образца пленки на наличие посторонних примесных элементов анализировался со стороны пленки и со стороны подложки (см. таблицу). Это связано с тем, что глубина микроанализа в углеродной матрице пленки превышает несколько микрометров, поэтому при измерении состава пленки элементы, входящие в состав подложки, будут зафиксированы в составе пленки.

Элементный состав полимерной пленки и подложки

Участок	Массовое содержание,%								
анализа	С	0	Na	Mg	Al	Si	Κ	Ca	Fe
Пленка	60,1	17,1	3,9	0,9	0,4	14,8	0,2	1,9	0,6
Подложка	-	42,6	10,9	2,5	1,1	37	0,5	5,3	-

Методом РФА установлено наличие в полимерной пленке примеси Fe на уровне 0,6 %, что свидетельствует о вытравливании материала электрода емкостным разрядом.

Для определения макросостава полимера свободную полимерную пленку разлагали в пиролитической ячейке, а газообразные продукты разложения анализировались квадрупольным масс-спектрометром. По соотношению площадей пиков диоксида углерода и воды с учетом коэффициента чувствительности, найденного в калибровочных опытах, рассчитывали соотношение атомов углерода и водорода в исследуемом полимере. В результате измерений получено среднее соотношение С:Н в образцах пленок равное 2,5:1.

Для образцов пленок СН-полимера, нанесенного на стеклянную подложку, определялась шероховатость поверхности. Типичные изображения поверхности СН приведены на рис. 5.



Рис. 5. АСМ-изображение поверхности СН-полимера на стеклянной подложке

По данным АСМ среднеквадратичная шероховатость всех измеренных образцов не превышает 10 нм.

Выводы

Таким образом, методом плазмохимической полимеризации получены пленки CH-и CD-полимеров из бензола C_6H_6 /водорода H_2 и дейтерированного бензола C_6D_6 /дейтерия D_2 . При расшифровке ИКспектров осажденных пленок установлено наличие насыщенных и ненасыщенных алифатических и ароматических структур, формирующих слои полимера.

На полученных электронных микрофотографиях поверхности пленки видно, что структура пленка имеет плотную структуру без пор, на поверхности имеются неровности. Методом РФА установлено содержание в осаждаемых слоях примеси железа на уровне 0,6 %, обусловленных вытравлением электродов разрядом.

Измеренная методом атомно-силовой микроскопии среднеквадратичная шероховатость не превышает 10 нм.

Для СН-полимера методом термомасс-спектрометрического анализа определено соотношение С:Н, которое составляет 2,5:1.

Литература

1. Bodner S. E., Colombant D. E., Schmitt A. J., Klapisch M. High-gain direct-drive target design for laser fusion // Physics of plasmas, 2000. Vol. 7, N 6. P. 2298-2301.

2. Letts S. A. et al. Fabrication of Polymer Shells Using a Depolymerizable Mandrel // Fusion Technology. 1995. Vol. 28, N 5. P. 1797–1802.

3. Nikroo A., Czechowicz D. G., Castillo E. R. and Pontelandolfo J. M. Production of Higher Strength Thin

Walled Glow Discharge Polymer Shells for Cryogenic Experiments at OMEGA // 2nd International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. - Kyoto, Japan, 2001.

4. Chen K. C., Huang H., Nikroo A., Letts S. A., R. C. Cook Fabrication Of Graded Germanium-Doped CH Shells // Fusion Science and Technology. 2005.

5. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

6. Пентин Ю. А., Вилков Л. В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2006.

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ТУК-159

<u>Д. Ю. Смирнов</u>, А. В. Виноградов, С. В. Леонтьев, И. А. Барченков, В. И. Кечин, О. С. Абрашкин, Т. В. Лазуткина

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

Введение

В условиях напряженной политической обстановки в мире в отношении Российской Федерации имеется необходимость в разработке российской продукции в сфере атомной энергетики для решения обострившейся за последние годы проблемы импортозамещения. При продвижении российских технологий на мировой рынок исследовательских реакторов существует потребность в сертифицированном в России и за рубежом транспортном упаковочном комплекте для перевозки всеми видами транспорта, включая воздушный, ураносодержащих материалов с обогащением по ²³⁵U до 20 %.

Отсутствие в настоящее время подобных ТУК в РФ, сложности и не выгодные условия аренды ТУК иностранного производства, вызванные конфликтом интересов на мировом рынке топлива для исследовательских реакторов, не позволяют российским предприятиям полноценно решать вопросы по поставкам подобной продукции.

В 2016 году ПАО «НЗХК»/АО «ТВЭЛ» был инициирован проект по разработке и сертификации российского ТУК для перевозки всеми видами транспорта ураносодержащих материалов обогащением по ²³⁵U до 20 % различной физической и химической формы.

Разработку технического проекта на ТУК-159 осуществлял ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, обладающий опытом разработки транспортных упаковочных комплектов и имеющий аттестованную экспериментальную базу для проведения полного комплекса испытаний ТУК на соответствие требованиям Правил МАГАТЭ SSR-6.

Основание для проведения работы

Основанием для проведения работы являются:

– договор на выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка и сертификация транспортного упаковочного комплекта для перевозки урансодержащих материалов всеми видами транспорта, включая воздушный», заключенный между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ПАО «НЗХК»;

- техническое задание на опытно-конструкторскую работу, разработанное на основании договора.

Цель работы

Разработка транспортного упаковочного комплекта для перевозки ураносодержащих материалов (порошок, гранулы, таблетки) всеми видами транспорта.

Анализ существующего парка контейнеров и выбор конструкции ТУК

Для осуществления экспортных поставок урансодержащих материалов воздушным транспортом российские предприятия используют либо арендованные транспортные упаковочные комплекты, владельцами которых являются зарубежные компании (ТУК LEUPA – Аргентина, ТУК TN BGC – Франция), либо модернизированные российские транспортные упаковочные комплекты, изначально не предназначенные для поставки данных материалов (ТУК ТК-С16, ТУК ТК-С15).

К современным контейнерам предъявляются высокие требования, прежде всего по обеспечению надежной биологической защиты от ионизирующего излучения, исключению выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду, ядерной безопасности, сохранению герметичности в аварийных ситуациях (пожар, падение контейнера с вагона, падение контейнера в воду и т. п.) и отводу тепла в окружающую среду.

Одна из главных задач разработки ТУК-159 – импортозамещение ТУК типа TN BGC1. Конструкция должна соответствовать требованиям НП-053-16 [4] и МАГАТЭ (SSR-6) [5]. Технические требования представлены в табл. 1. Основные характеристики ТУК-159 в сравнении с TN BGC приведены в табл. 2.

Таблица 1

Технические требования

Требование	Значение		
Максимальный габарит по ширине, мм	800		
Индекс безопасности по критичности	≤ 1		
Обогащение перевозимого материала	до 20 % по ²³⁵ U		
Возможность воздушных перевозок			
Соответствие НП-053-16 и МАГАТЭ SSR-6			

Таблица 2

Наименование параметра	ТУК-159	TN BGC
Масса порожнего ТУК, кг	448	280
Масса перевозимого содер- жимого, кг	до 50	35
Габариты корпуса, мм	Ø700×872	1821×600×600
Максимальная температура наружной поверхности, °С	69,8	-
Максимальная суммарная мощность эффективной дозы на поверхности, мЗв/ч	5,02e-3	-
Обогащение перевозимого содержимого по 235U, %	20	_
Срок службы, не менее	30 лет	_

Характеристики ТУК

Устройство и работа ТУК-159

При разработке конструкции последовательно рассматривалось 12 вариантов конструкции упаковки ТУК-159. Для каждого варианта конструкции рассматривалось несколько расчетных случаев, отличающихся ориентацией контейнера в момент удара. В результате расчетов определялись слабые места конструкции, факт разрушения или сохранения прочности крепежа, крышек контейнера и силовых корпусов. В итоге 12-ый вариант конструкции признан удовлетворяющим выбранному критерию безопасности – сохранению прочности хотя бы одного из двух силовых контуров.

Основной элемент конструкции транспортного упаковочного комплекта (рис. 1) представляет собой цилиндрический толстостенный кованый стальной корпус, содержащий чехол с пятью гнездами для установки в них емкостей, по две в каждое гнездо. Для обеспечения ядерной безопасности свободные полости чехла вокруг гнезд для емкостей заполнены борсодержащим материалом. Емкость состоит из цилиндрического корпуса и крышки, соединенных между собой резьбой, и предназначена для упаковывания перевозимого материала. Чехол и десять емкостей поджимаются во внутреннем корпусе крышкой и закрепляются при помощи 24 усиленных болтов М12. На корпусе внутреннем имеются грузоподъемные элементы, предназначенные для обращения с ним. Масса внутреннего корпуса без перевозимого материала составляет 130 кг.

Корпус внутренний устанавливается в корпусе силовом днищем вверх (крышкой вниз). Корпус силовой представляет собой деревянный демпфер цилиндрической формы с глухим цилиндрическим ступенчатым вырезом по оси вращения, облицованный двухмиллиметровой сталью и с толстостенным кованым стальным стаканом, соединенным болтами с внутренней поверхностью стальной облицовки деревянного демпфера.



Рис. 1. Общий вид ТУК-159 [6]

Корпус внутренний поджимается в корпусе силовом крышкой и закрепляется при помощи 24 усиленных болтов М16. Уплотнительным элементом между корпусами и крышками является паронит.

Конструкция закрывается заглушкой при помощи 8 гаек М12. Заглушка представляет собой деревянный демпфер цилиндрической формы, облицованный нержавеющей сталью. На наружной поверхности ТУК приварены четыре проушины, предназначенные для закрепления в транспортном средстве и для подъема, а также четыре опоры, предусмотренные для ярусного хранения. Деревянные демпфера покрыты огнезащитным составом и предназначены для защиты перевозимого материала, при аварийных воздействиях. В зазоре между стальной облицовкой и деревянным корпусом располагается теплоизоляционный материал на основе базальтовой ткани. В конструкции ТУК-159 используется нержавеющие стали 12X18Н10Т, 14X17Н2. Крепежные элементы выполнены из высоколегированной стали 38XH3MA, 07X16H45.

Расчетное обоснование безопасности

Компьютерное моделирование динамического деформирования упаковки ТУК-159 выполнено на основе российских программных средств ЛОГОС (модуль «ПРОЧНОСТЬ») разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ, предназначенного для численного решения трехмерных задач статического и динамического деформирования пространственных конструкций при термосиловых воздействиях.

Для проведения исследований принимается, что емкости заполнены ураносодержащим порошком на 90 % объема. После выбора окончательного варианта конструкции контейнера ТУК-159 проводились расчетные исследования прочности упаковки на соответствие требованиям безопасной транспортировки: свободное падение с высоты 9 м, раздавливание плитой, падение на штырь, воздействие пожара, проведение испытаний на ракетном треке (удар со скоростью не менее 90 м/с).

При анализе результатов расчетов и выдаче заключения о соответствии упаковки предъявляемым требованиям по прочности принимается, что упаковка удовлетворяет требованиям безопасности, если сохраняется прочность хотя бы одного из трех защитных контуров, а именно: емкостей, внешнего или внутреннего корпуса [3].

Испытания на удар со скоростью 90 м/с

По результатам расчетов на высокоскоростное столкновение (90 м/с), было рассмотрено 5 расчетных случаев. В результате было определено, что при угловой ориентации контейнера в элементах конструкции возникают наибольшие повреждения. Данная ориентация (рис. 2) была рекомендована для проведения зачетных испытаний. Согласно расчетным данным, в процессе соударения с преградой, обеспечивается сохранение прочности одного из трех контуров защиты, а именно внутреннего бюкса, поэтому можно сделать вывод, что упаковка выдерживает угловое столкновение через центр масс на крышку.



Рис. 2. Деформированное состояние упаковки при ударе со скоростью 90 м/с

Испытание на падение с 9 м

При моделировании свободного падения упаковки на недеформируемую преграду с высоты H = 9м рассмотрено пять вариантов ориентации контейнера при соударении с преградой (два осевых падения, два центральных угловых падения, боковое падение). Прочность упаковки сохраняется с большими запасами прочности (не менее 5), что позволяет сделать заключение о сохранении прочности упаковки при рассмотренных ориентациях падения с H = 9 м. Наибольший уровень деформаций упаковка испытывает при боковом падении (рис. 3), поэтому падение рекомендовано для проведения испытаний на механическое повреждение при падении с H = 9 м.

Все основные элементы конструкции контейнера ТУК-159 в каждом расчетном случае сохраняют свою прочность.



Рис. 3. Деформированная форма упаковки после падения с высоты 9 м

Испытание на раздавливание

ТУК-159 подвергается динамическому раздавливанию, при котором он получает максимальное повреждение при падении на него тела массой 500 кг с высоты 9 м (рис. 4).



Рис. 4. Расчетный случай падения плиты на контейнер

Анализ результатов показывает, что уровень перегрузок элементов упаковки в среднем на 100–500 ед. выше по сравнению с уровнем перегрузок при боковом падении упаковки с высоты H = 9 м на мишень и составил ~1300...1500 ед. При этом длительность импульсов перегрузок уменьшилась с τ ~2...2,3мс до τ ~1...1,3мс.

Испытание на прокол

Опытный образец упаковки должен быть подвергнут разрушающему воздействию твердого штыря, изготовленного из мягкой стали. Положение штыря по отношению к поверхности образца должно быть таким, чтобы вызвать максимальное повреждение при завершении серии испытаний.

Расчетный случай падения упаковки на штырь представлен на рис. 5.

16 Деформация после падения плиты с 9 м Деформация после падения контейнера с 9 м и падения плиты

Рис. 5. Расчетный случай падения упаковки на штырь

Все элементы конструкции упаковки ТУК-159 сохраняют прочность, пробитие корпуса контейнера не происходит.

Усиленное тепловое испытание (пожар)

В аварийных условиях воздействие пожара моделируется на всей наружной поверхности. В качестве начального принимается установившееся распределение тем пературы, полученное от действия солнечной инсоляции при тем пературе окружающей среды 38 °C. Остывание контейнера после воздействия пожара происходит в среде с тем пературой 38°C.



Рис. 6. Распределение температур на момент достижения максимума температуры на содержимом – 7,5 часа

В условиях аварийного теплового воздействия согласно требованиям НП-053-16 и SSR-6, а именно пребывание в среде с температурой 800 °C в течение 60 мин с последующим остыванием в среде с температурой 38 °C, максимум температуры на элементах системы герметизации (на прокладках из паронита и резины) не превышает допустимой температуры применения равной 250 °C (рис. 6).

Обоснование ядерной и радиационной безопасности

В рамках расчетного обоснования ядерной и радиационной безопасности определен коэффициент размножения нейтронов, мощность эффективной дозы излучения, а также индекс безопасности по критичности. Расчеты проводились с использованием программного комплекса TDMCC. Решение задачи выполнялось по методу Монте-Карло для совместного переноса нейтронов и γ-квантов в трехмерных системах. При этом учитывалось состояние упаковки в нормальных и аварийных условиях перевозки.

Согласно результатам проведенных расчетов, транспортный упаковочный комплект ТУК-159, загруженный урансодержащими материалами общей массой до 50 кг (обогащение до 20 % по ²³⁵U), обеспечивает выполнение требований НП-053-16 [4], НРБ-99/2009 [2] и правил SSR-6 (МАГАТЭ) [5] по ядерной и радиационной безопасности, как в нормальных, так и аварийных условиях перевозки. Допускается транспортировка всеми видами транспорта, включая воздушный, группы упаковок ТУК-159 в количестве до 50 штук. Индекс безопасности по критичности ИБК = 1. Значение транспортного индекса (ТИ) составляет: ТИ = 0.

Испытания макетов ТУК-159

Испытания проводились в соответствии с правилами SSR-6 и НП-053-16. Для испытаний было изготовлено два макета ТУК-159, а также комплект специальной оснастки.

Испытание на падение с 9 м

Горизонтально подвешенный (с помощью гибких строп) ТУК-159 крепился на крюке крана и сбрасывался на мишень (стальная плита размерами 2,0×3,0 м, закрепленная на бетонном основании). Место соударения с мишенью находилось между проушинами, предназначенными для подъема и переноса упаковки. Высота сброса составляла 9,0 м и отсчитывалась от поверхности плиты до ближайшей к ней точки ТУК.

Из полученных данных видно (рис. 7), что диаметр макета уменьшился, а высота увеличилась, что связано с замятием зоны контакта макета с мишенью.

Испытание на раздавливание

Горизонтально расположенный ТУК-159 устанавливался на стальную плиту, закрепленную на бетонном основании таким образом, чтобы поверхность упаковки, деформированная при предыдущем испытании, находилась в месте контакта с падающей плитой. После чего на упаковку с высоты H=9,0 м горизонтально сбрасывалась стальная плита массой 500 кг и габаритами 1х1м. Высота сброса измерялась от верхней точки ТУК-159 до нижней поверхности подвешенной плиты.

После испытания были зафиксированы следующие повреждения макета ТУК-159: замятие внешней облицовки в зоне контакта макета с мишенью и в зоне противоположной зоне контакта макета с мишенью, трещина в сварном шве у одной из опор, вмятина без нарушения целостности на внешней облицовке от удара после отскока плиты.

Испытание на прокол

Горизонтально подвешенный ТУК-159 (с помощью гибких строп) крепился на крюке крана и сбрасывался с высоты H = 3,0 м на стальной штырь. Штырь представлял собой конус диаметром 20 см в основании, высотой 30 см и диаметром вершины 2,5 см. Штырь закреплялся на мишени в вертикальном положении с помощью восьми болтов M8. Макет ТУК-159 при испытании был расположен таким образом, чтобы удар пришелся на центр масс и место с наибольшими повреждениями после предыдущих испытаний. Высота сброса измерялась от нижней точки ТУК до верхней точки штыря.

После испытания были зафиксировано пробитие внешней облицовки нижнего демпфера (рис.7). Причиной отличия от результатов расчета является математическая модель материала, используемая для моделирования древесины. При падении на штырь слои древесины работают на сдвиг, что требует дополнительной калибровки математической модели, которая была выполнена в дальнейшем.



Рис. 7. ТУК-159 после испытаний

Усиленное тепловое испытание (пожар)

В соответствии с требованиями п.п. 3.4.4.3 и 3.4.6.3 НП-053-16 упаковка должна подвергаться тепловому воздействию при среднеобъемной температуре пламени не менее 800 °С в течение 60 минут в условиях пожара (рис. 8).



Рис. 8. Показания всех термопар установленных внутри (T1, T2) и снаружи (T3-T11) макета ТУК-159

По окончании испытаний на усиленное тепловое испытание после охлаждения в естественно-климатических условиях макет ТУК-159 был передан для проведения дефектации. В результате дефектации отмечено:

 – целостность паронитовых прокладок крышек не нарушена;

 отсутствие просыпи борсодержащего материала из чехла во внутреннюю полость корпуса внутреннего;

 отсутствие просыпи имитатора перевозимого содержимого из емкостей во внутреннюю полость корпуса внутреннего.

Испытания на удар со скоростью 90 м/с

Согласно результатам расчетных исследований, из всех рассмотренных случаев соударения ТУК с преградой со скоростью 95 м/с, наибольшее деформирование конструкции происходит при угловом ударе через центр масс со стороны основания (φ ~57°). Поэтому данное направление было выбрано для проведения испытания. Испытание выполнено с участием межведомственной комиссии, которая назначена Распоряжением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Задачей испытания являлась экспериментальная проверка:

 эффективности работы демпфирующих элементов конструкции ТУК-159;

 отсутствие выхода перевозимого материала из ТУК-159.

Расчетная скорость столкновения ТУК-159 с мишенью – 95±5 м/с, начальный угол между вектором скорости полета макета (после схода с рельсовой направляющей (PH) трека) и его осью – 47±5° (определен из условия, приводящего к максимальным повреждениям при столкновении с мишенью).

Разгон ТУК-159 до заданной скорости по PH ракетного трека и его столкновение с мишенью, при заданном направлении и угле встречи, обеспечивались комплектом специальной оснастки (рис. 9).



Рис. 9. Общий вид ракетного поезда

После запуска ракетных двигателей ракетный поезд (РП) начинал движение по рельсовой направляющей ракетного трека. По окончании работы ракетных двигателей и достижении ракетным поездом заданной скорости движения были задействованы пороховые аккумуляторы давления тормозного башмака, что привело к остановке РП на рельсовой направляющей ракетного трека. При этом ТУК-159, за счет полученного импульса, продолжал движение по рельсовой направляющей. После схода с рельсовой направляющей ракетного трека ТУК-159 двигался в свободном полете до столкновения с мишенью.

Мишень ракетного трека выполнена в соответствии с рекомендациями Правил НП-053-16 и SSR-6, представляет собой железобетонный блок, облицованный со стороны лобовой стенки стальным листом толщиной 100 мм. Габариты лобовой стенки – 2,4×3,6 м. Мишень смонтирована с упором задней стенки в протяженный насыпной вал и дополнительно, с боковых сторон и сверху, обвалована грунтом. Полная масса мишени с учетом обваловки грунтом составляет ~600 т.

По результатам испытания, деревянный демпфер был разрушен, при этом внутренний корпус сохранил свою целостность.

Подводя итоги, можно отметить:

 испытания упаковки (макета ТУК–159), загруженной имитатором перевозимого содержимого и изготовленной в ПАО «Русполимет» в 3 квартале 2017 года, проведены в полном объеме, предусмотренном программами испытаний;

 в процессе испытаний параметры нагружения соответствовали требуемым значениям;

— в результате испытаний на механические повреждения: падение на мишень с высоты H = 9,0м, на динамическое раздавливание (удар плитой), на прокол (разрыв), усиленное тепловое испытание, удар со скоростью не менее 90 м/с макет ТУК-159 сохранил целостность емкостей, загруженных имитатором перевозимого содержимого. Выхода имитатора перевозимого содержимого (материала) из упаковки не произошло.

Верификация расчетных данных

Результаты испытаний подтвердили соответствие упаковки ТУК-159 требованиям безопасной транспортировки. Кроме этого, в ходе испытаний и по результатам дефектации был получен большой объем данных по деформированному состоянию упаковки.

На рис. 10 представлены деформированные конфигурации элементов упаковки, полученные по результатам расчетов и экспериментов на столкновение при скорости 90 м/с. Видно, что результаты расчетов и экспериментов качественно согласуются между собой.





Рис. 10. Деформированная форма элементов ТУК

Близость расчетных результатов и опытных данных по характеру общих деформаций (изменение исходной формы, смятие) конструкции контейнера подтверждает достоверность компьютерного моделирования выполненного на основе отечественного программного комплекса ЛОГОС.

Таким образом, можно заключить, что грамотное использование суперкомпьютерных технологий имитационного моделирования позволило в кратчайшие сроки разработать конструкцию упаковки, удовлетворяющей всем требованиям безопасности при транспортировке радиоактивных материалов, а также выбрать оптимальное положение опытных образцов при проведении испытаний.

Заключение

Благодаря слаженной работе команды ПАО «НЗХК», г. Новосибирск (заказчик работ по проекту, разработчик рабочей конструкторской документации), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров (разработчик технического проекта, расчетное и экспериментальное обоснование безопасности конструкции), ПАО «Русполимет», г. Кулебаки (изготовитель макетов и головной партии ТУК-159), ФГУП "АТЦ СПб", г. Санкт-Петербург (экспертиза обоснования безопасности), проект по созданию ТУК-159 с колоссальным объемом работ был реализован в строгом соответствии с директивным графиком верхнего уровня и в рекордный для подобных проектов срок – 12 месяцев.

Результатом проделанной работы является конструкция транспортного упаковочного комплекта, соответствующая требованиям НП-053-16 и МАГАТЭ (SSR-6) по безопасности.

Данная конструкция превосходит зарубежные аналоги по количеству перевозимого материала. Конструкция пригодна для транспортирования ураносодержащих материалов всеми видами транспорта, включая воздушные. В ТУК-159 имеется потенциал для расширения номенклатуры перевозимого радиоактивного содержимого, как по химическому составу, так и по обогащению.

ТУК-159 существенно повышает конкурентоспособность отрасли при поставках ураносодержащей продукции на международные рынках, исключает зависимость отрасли от зарубежных владельцев аналогичных транспортных упаковочных комплектов и обеспечивает импортозамещение данных ТУК. Конструкция является полностью российской разработкой и не зависит от импортных комплектующих.

На данный момент конструкции присвоена литера О1 и изготовлена головная партия из пяти штатных изделий ТУК-159.

Литература

1. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49–52.

2. Нормы радиационной безопасности, НРБ-99/2009.

3. Нормы расчета на прочность транспортноупаковочных комплектов для перевозки ядерных делящихся материалов. НРП-93.

4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов, НП-053-16, Москва.

5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the safe Transport of Radioactive material, 2012 Edition, Specific Safety Requirements No. SSR-6, IAEA, Vienna (2012).

6. Пат. RU № 2581648 РФ, МКИ G21F5/00. Транспортный упаковочный комплект для транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива / А. В. Бондарев, С. Ф. Долбищев // Бюллетень изобретений. 2016. № 11.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТА МАЛОГАБАРИТНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ

<u>С. И. Смирнова</u>, Р. Х. Нураев, А. И. Демарёва

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

Приборы малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА) подвергаются воздействиям различных типов вибрации в диапазоне от 3 до 3000 Гц при ускорении 2...40 g. Для снижения влияния вибрационных нагрузок на МБА существуют активные и пассивные средства защиты, а также совместное использование двух этих типов – гибридные. Пассивные системы позволяют смягчить ударное воздействие и погасить колебания в устройстве, широко применяются в лабораторных и промышленных условиях. Также широко применяется заливка приборов полимерными компаундами [1], амортизирующие платформы [2]. Основным недостатком пассивных средств защиты является отсутствие возможности изменить подавляемую частоту, а также, при использовании заливки, практически полную не ремонтопригодность МБА [3].

Возможным решением подобных проблем является применение активных средств виброзащиты. Такие системы предназначены для снижения влияния вибрации на элементы МБА во всем требуемом диапазоне частот, что обеспечивается присутствием гасителей вибровоздействия с дополнительным источником энергии. В состав систем активной виброзащиты (САВ), как правило, входят акселерометры для обнаружения и фиксации колебаний, микропроцессорные системы анализа колебаний и формирования управляющих сигналов – блок управления, а также механизм реализации активной компенсации, генерирующий противофазные колебания – устройство компенсации.

Представленный в данной работе макет САВ размещается непосредственно на печатной плате из состава МБА, причем, взамен упругих элементов на основе виброизоляторов (амортизаторов) используются упругие свойства печатной платы. На печатной плате размещены следующие основные составные части (рис. 1):

 – акселерометр для снятия показаний воздействия вибраций;

 – устройство компенсации вибрации – электромагнит (катушка).

Макет малогабаритной САВ работает следующим образом, при воздействии вибрации электрический сигнал с акселерометра пропорциональный механическим колебаниям подается на усилитель заряда, с усилителя заряда сигнал поступает на фазовращатель и с него на подвижные катушки электромагнита 3, которые механически связаны с защищаемой печатной платой 1. Подвижные катушки электромагнита преобразуют электрический сигнал в пропорциональный ему механический, для компенсации вибрации печатной платы.

Электродинамическая система компенсации вибраций (вибратор 3) обладает рядом преимуществ (по сравнению с пневматической и гидравлической системами):

- большое быстродействие;
- высокая стабильность характеристик;
- малой инерционностью;

 возможность варьировать широких пределах амплитудно-частотные характеристики (в отличие от пневматических систем, которые позволяют получать небольшие величины статической жесткости).

Принцип действия электродинамического вибратора заключается, в взаимодействии постоянного и переменного магнитных полей, возникающем при прохождении тока звуковой частоты в цилиндрической катушке, находящейся в постоянном магнитном поле. Взаимодействие полей вызывает появление механической силы, которая обусловливает возвратно-поступательное перемещение подвижной катушки и связанных с ней элементов по закону изменения переменного тока. Катушка подвешена на упругом элементе (плате), сила упругого сопротивления которого уравновешивает вес катушки и направляет ее движение.



Рис. 1. Макет малогабаритной САВ: 1 – печатная плата защищаемого устройства, 2 – акселерометр, 3 – электромагнит (вибратор), 4 – корпус

Вибратор представляет собой электродинамический привод, состоящий из движимой части – штока и двух катушек, и недвижимой части – корпуса, крышки, втулки, катушки и контактов (рис. 2). Провода катушек через корпус выведены на контакты (рис. 3), через которые подается напряжения для приведения штока в движение по заданному закону.



Рис. 2. Конструкция электродинамического привода: 1 – катушка неподвижная, 2 – катушки подвижные, 3 - контакты, 4 – корпус, 5 – крышка, 6 – втулка, 7 – шток, 8 – шайба, 9, 10 – винт



Рис.3. Внешний вид макета малогабаритной САВ

Были проведены экспериментальные исследования эффективности макета малогабаритной САВ при следующих внешних воздействующих факторах:

 – широкополосная случайная вибрация (ШСВ)
с синусоидальной амплитудой 2 g в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц;

 ШСВ с СКЗ ускорения 15 g в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц. Длительность воздействия – 25 с.

Проверка эффективности макета малогабаритной САВ проводилась по схеме, показанной на рис. 4, перечень оборудования приведен в таблице.

Перечень оборудования для проверки эффективности макета САВ

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
A1	Макет САВ	1	
A2,A3	Усилитель заряда	2	
A4	Жгут технологический	1	
A5-A7	Фидер	3	Из комплекта Г5-82
A8	Пульт технологический	1	
A9	Жгут технологический	1	
P1	Осциллограф TDS 3012	1	
G1	Источник питания посто- янного тока Agilent E3648A	1	
G2	Источник питания посто- янного тока Agilent E3648A	1	

Изменяя значения параметров «усиление», «фаза» с помощью пульта технологического A8 (рис. 4) и изменяя выходное напряжение источнике питания постоянного тока G1, добивались снижения амплитуды сигнала по каналу CH2 осциллографа P1.

Результаты экспериментальных исследований показали достаточную эффективность макета малогабаритной САВ при воздействии ШСВ в широком диапазоне частот.

Предметом дальнейших исследований станет разработка макета малогабаритной САВ с интегрированной в него системой управления, аналогичной показанной на рис. 4.



Рис. 4. Схема проверки эффективности макета САВ

Литература

1. Иванов А. В., Куфтин А. А., Демарева А. И. и др. «Защита малогабаритной бортовой аппаратуры от вибрационных и ударных воздействий»

2. Пат. 2410583 РФ. Устройство для защиты

3. Пат. 2406620 РФ. Система активной виброзащиты и стабилизации / Фурунжиев Р. И., Хомич А. Л.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В ГИЛЬЗЕ ЭЛЕВАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-800, ПРИ АВАРИЙНОМ СЛУЧАЕ ВО ВРЕМЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ

А. В. Рябцов, Д. А. Лапшин, <u>А. М. Татарский</u>

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Введение

Современные требования по обеспечению безопасности конструкций систем обращения с ядерными материалами сводятся к необходимости обеспечения их механической прочности, достаточной для сохранения герметичности во время выполнения транспортно-технологических операций [1]. На этапе проектирования указанная задача сводится к всесторонним исследованиям возможных проектных аварий и связанных с ними последствий.

Важным аспектом обеспечения безопасности реакторов на быстрых нейтронах является обоснование динамической прочности тепловыделяющих сборок (TBC) применительно аварийным ситуациям на оборудовании внутриреакторной транспортировки.

Для внутриреакторной транспортировки радиоактивных материалов в реакторах типа БН применяют специально разработанные для этого элеваторы, к которым предъявляются повышенные требования безопасности. Например, элеватор должен отвечать требованиям динамической прочности в условиях воздействия ударных нагрузок высокой интенсивности, обладать определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки. При этом конструкция элеватора должна исключать возможность выпадения из него ТВС, а также любые нарушения в его положении при работе с ядерным топливом.

Выполнение подобных требований обеспечивается в основном за счет сохранения целостности (герметичности) ТВС и отсутствия в ней недопустимого формоизменения. Постановка представительных натурных испытаний элеваторов с ТВС при динамических воздействиях затруднено как в силу их значительной стоимости, так и неочевидности получения представительных результатов при ограниченном числе таких испытаний.

В подобных обстоятельствах особую значимость приобретает возможность отработки конструкции на стадии проектирования путем выполнения представительных расчетных исследований [2, 3]. Подобный анализ, связанный с исследованием высоконелинейных динамических процессов деформирования металла, стал возможен в последнее время благодаря исследованиям процессов деформирования и разрушения твердых тел в условиях интенсивных динамических нагрузок и разработке на этой основе соответствующих математических моделей и вычислительных комплексов типа ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS и т. д. Реализуемое в подобных программных комплексах полномасштабное математическое 3D-моделирование позволяет выполнять достаточно глубокий и детальный анализ динамических процессов, сократив и удешевив на этой основе сроки проектирования [2–6].

Описание конструкции

В данной статье исследуется напряженнодеформированное состояние (НДС) ТВС, находящейся в гильзе элеватора реактора БН-800, в случае нештатного схода каретки с ТВС по направляющей, приводящего к ее ударному взаимодействию с преградой. Актуальность работы определяется имевшими место подобными событиями.

Элеватор (рис. 1) предназначен для перемещения сборок активной зоны при перегрузке реактора от активной зоны до каналов перегрузочной машины и обратно. В состав элеватора входят привод элеватора, пробка, каретка, гильза, направляющая, штанга, цепь, трубы для перемещения цепи и штанги.

Внутриреакторное перегрузочное оборудование реакторов типа БН входит в состав первого контура и обеспечивает его герметизацию. После окончания перегрузки оно из реактора не извлекается и при работе реактора на мощности подвергается облучению высокими нейтронными и гамма потоками. Такие жесткие условия работы и невозможность визуального контроля над процессом перегрузки, предъявляют высокие требования к надежности данной конструкции.

Рассматривается соударение каретки элеватора с жестким основанием при сходе каретки по направляющей с высоты не более h = 5355 мм со скоростью v = 7 м/с.

Расчетный анализ аварии, связанной с падением выполнен с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA [7].

Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA верифицирован. Для верификации ПК ANSYS/LS-DYNA были решены следующие группы задач:



Рис. 1. Общий вид элеватора

 – сравнительный анализ результатов расчета по программе ANSYS/LS-DYNA с аналитическими решениями. Рассматривались аналитические решения, как в квазистатической постановке, так и с учетом возникновения и распространения с конечной скоростью волны напряжений и деформаций в ударяемых конструкциях;

 сравнительный анализ результатов расчета по программе ANSYS/LS-DYNA с результатами экспериментов.

Для анализа прочности ТВС в случае нештатного схода каретки элеватора по направляющей использовалась модель, представленная на рис. 2.

ТВС состоит из трех основных частей: головки, средней части и хвостовика.

Головка предназначена для организации выхода натрия, размещения дистанционирующих платиков, для сцепления TBC с устройствами системы перегрузки и транспортно-технологического тракта при загрузке и вы грузке TBC.

Средняя часть представляет собой шестигранную трубу из ферритно-мартенситной стали ЭП-450, к торцам которой приварены головка и переходник. К переходнику на резьбе крепится хвостовик. Внутри шестигранной трубы размещены один над другим пучок тепловыделяющих элементов (твэл) и пучок поглощающих элементов (ПЭЛ). Твэлы в пучке дистанционируются навитой на них проволокой. Круглой на центральных твэлах, профильной (овальной) – на периферийных твэлах.

Хвостовик предназначен для установки ТВС вертикально в гнездо коллектора и обеспечения заданного расхода натрия через каждую ТВС, в зависимости от ее места расположения в реакторе.

В реакторе ТВС дистанционируются с соседними сборками активной зоны при помощи шестигранного выступа в нижней части головки (платики). В исходном состоянии между сборками на уровне платиков существует зазор [8].



Рис. 2. Общий вид ТВС

Методика построения и описание расчетной модели

Полная расчетная модель, состоящая из модели элеватора и TBC, показана на рис. 3.

Расчетный анализ прочности элеватора при аварийном сходе каретки проводился на предыдущем этапе работы [9]. При оценке прочности элеватора моделировался только макет ТВС с сохранением массы и габаритов. Анализ напряжено-деформированного состояния элементов элеватора показал, что условия динамической прочности конструкции выполняется, поскольку действующие деформации не превышают предельных.

Расчетная модель ТВС (рис. 4) выполнялась с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного в Ростехнадзоре ПК ANSYS [10], основанного на методе конечных элементов (КЭ).

Исходя из имеющихся требований в ПК ANSYS/LS-DYNA к размеру и количеству конечных элементов, из особенностей конструкции и условий нагружения, строилась расчетная конечно-элементная 3D модель ТВС. При разработке КЭ модели выполнена дискретизация КЭ сетки. Размер гексаэдрических элементов подбирался в соответствии с особенностями геометрии конструкции и особенностями условий нагружения.



Рис. 3. Общий вид расчетной модели

В зонах концентрации напряжений выполнено сгущение сетки. КЭ модель ТВС состоит из 210000 конечных элементов. Общая КЭ модель, состоящая из элеватора и ТВС – из 250000 конечных элементов.



Рис. 4. Расчетная модель ТВС

При построении расчетной модели основным критерием являлось наиболее полное отражение жесткостных и весовых характеристик элементов TBC, учет взаимодействия различных элементов в процессе деформирования:

 – элементы, не влияющие на прочность и жесткость конструкций, не моделировались, но с целью сохранения весовых характеристик конструкций реактора были учтены путем увеличения плотности материала внутрикорпусных элементов;

– элементы, участвующие в процессе деформирования, смоделированы в соответствии с реальной геометрией;

 – дистанционирование твэл проволочной навивкой моделировалось введением в модель дистанционирующих решеток с толщиной и шагом соответствующими конфигурации проволочной навивки;

 – элементы, вносящие вклад в общую жесткость конструкции, но прямое моделирование которых связано со значительными сложностями или нецелесообразно, смоделированы по критерию эквивалентной жесткости;

– каждая из составляющих конструкции смоделирована как отдельная часть; между частями заданы контактные задачи, учитывающие как статический, так и динамический коэффициенты трения; тип контакта задавался таким образом, что учитывалось не только взаимодействие контактных пар, но и формоизменение тела, когда отдельные его области начинают взаимодействовать между собой.

В качестве кинематических граничных условий принималось:

– начальная скорость, приложенная ко всем элементам (кроме абсолютно жестких тел), развиваемая к моменту соударения с жестким основанием v = 7 м/с;

- ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/c}^2$.

Для данной модели ТВС проводилась верификация по результатам экспериментально-математического анализа деформирования макетов при падении [8].

Сравнительный анализ результатов расчета НДС макетов ТВС в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA с результатами эксперимента (имитация аварийного падения) позволил сделать вывод о достоверности и точности модели ТВС. Таким образом, можно сделать вывод о применимости данной модели для анализа НДС и прочности исследуемой конструкции.

Экспериментальное исследование и математическое моделирование конструкционных материалов

В случае высокоскоростного динамического нагружения, сопровождающегося значительным пластическим деформированием, необходимо иметь действительные диаграммы деформирования. Действительные диаграммы получаются на основе расчетно-экспериментальных исследований путем определения параметров математической модели деформирования материалов.

Степень достоверности результатов численного моделирования процесса деформирования в процессе соударения во многом определяется качеством математических моделей, адекватно описывающих влияние условий нагружения на диаграммы деформирования конструкционных материалов.

В качестве конструкционного материала держателя верхнего, держателя твэл, хвостовика, штока и пробки ТВС используется коррозионностойкая сталь аустенитного класса 12Х18Н9. В расчете использованы результаты экспериментальных исследований данной стали в условиях сжатия и растяжения при различных скоростях деформации и температурах [11].

Для определения характеристик исследуемой стали при динамическом нагружении использовался метод Кольского по схеме Николаса с различными вариантами разрезного стержня Гопкинсона. Образцы испытывались при различных скоростях деформации и температурах.

В результате экспериментальных исследований [11] были получены диаграммы деформирования и предельные характеристики разрушения в диапазоне скоростей деформаций от 0,001 до 1500 с⁻¹ и при температурах от 20 до 350 °С. Для каждого режима нагружения (скорость деформации, температура) проводились повторные испытания. На основе серии полученных диаграмм для каждого режима испытаний определялась средняя кривая с характеристиками разброса экспериментальных данных (доверительные интервалы).

По результатам экспериментальных исследований деформирования стали 12Х18Н9 при статическом и динамическом нагружениях были определены параметры модели Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA. Модель Jonson-Cook определяет напряжение текучести как функцию деформации, скорости деформации и температуры [13].

Для верификации модели деформирования исследуемой стали использовались эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [14, 15] и на диагональное сжатие.

Относительная погрешность расчетного предсказания диаметра отпечатка, в случае использования конического индентора, составила 2,0 %, для сферического индентора – 0,4 %. В случае с диагональным сжатием образцов, относительная погрешность не превысила 9 %.

Результаты сравнения позволили сделать вывод о достаточной достоверности и точности используемой математической модели. Таким образом, совокупность экспериментальных данных свидетельствует о возможности применения используемой модели поведения применяемого конструкционного материала для инженерного анализа напряженно-деформированного состояния и прочности исследуемой конструкции в условиях динамического нагружения.

Расчетный анализ процесса схода каретки

Расчетный анализ схода каретки выполнялся в системе ANSYS/LS-DYNA аттестованного в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ программного комплекса ANSYS [10], основанной на методе конечных элементов и предназначенной для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики [7, 16].

Поскольку при ударе в конструкции индуцируются короткие по длине волны вибрационной природы, то для их описания применялись конечные элементы с большим числом степеней свободы.

Было установлено, что процесс схода каретки можно условно разделить на два этапа:

 на первом этапе происходит соударение демпфера каретки с опорой;

 на втором этапе происходит отскок каретки, сопровождающийся колебаниями гильзы с находящейся в ней ТВС.

На первом этапе за счет упруго-пластического деформирования дем пфера происходит гашение кинетической энергии каретки, при этом дем пфер испытывает максимальные ускорения, напряжения и деформации. В процессе соударения каретки с опорой происходит гашение значительной части кинетической энергии, но часть ее передается на гильзу с находящейся в ней ТВС.

На втором этапе за счет части непогашенной кинетической энергии происходит отскок каретки и колебание гильзы с находящейся в ней ТВС, которая совершает хаотичные колебательные движения (биение) в пределах кольцевого зазора и поступательное движение вдоль гильзы после отскока от дна.

Поскольку элементы ТВС в процессе удара работают в области упругопластических деформаций, в качестве основного критерия состояния ТВС принималась относительная деформация.

За условие динамической прочности принималось соотношение:

$$\varepsilon \le \varepsilon_{\text{пред}},$$
 (1)

где ε — относительная динамическая деформация, полученная в результате расчета, %; ε_{пред} — предельная относительная деформация, %.

В качестве предельной, принимается деформация разрушения при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Она определена по относительному поперечному сужению ψ сечения образца в месте разрыва [15]:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left(\frac{1}{1 - 0,01\psi} \right) \cdot 100 \%, \tag{2}$$

-для стали 12X18H9 $- \varepsilon_{\text{прел}} = 73$ %;

 – для материалов, указанных в таблице - ε_{ппел} = 92 %.

Наибольшие величины относительной пластической деформации элементов ТВС (рис. 9–14) составляют:

- в решетке ПЭЛ $\epsilon = 7,5 \% < \epsilon_{пред} = 92 \%;$

– в держателе верхнем $\varepsilon = 6 \% < \varepsilon_{\text{прел}} = 73 \%;$

- в держателе твэл $\varepsilon = 5, 4 \% < \varepsilon_{\text{прел}} = 73 \%;$

- в твэл $\epsilon = 2,9 \% < \epsilon_{пред} = 92 \%;$

$$-$$
 в хвостовике $\varepsilon = 1,2 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 73 \%;$

Для всех элементов конструкции условие динамической прочности выполняется, поскольку величины деформаций не превышают предельных значений.

Также рассматривалось соударение каретки элеватора без демпфирующего элемента о жесткое основание. В процессе соударения гашение кинетической энергии происходит за счет упруго-пластического деформирования каретки.

Сравнение величины пластических деформаций в элементах ТВС представлены в таблице.

Относительная деформация в элементах конструкции

V อนอาจบ <i>เก</i> รมกาม มั	Относительная пластическая деформация ε, %			
элемент	Без демпфи-	С использовани-		
	рующего эле-	ем демпфирую-		
	мента	щего элемента		
Держатель верхний	12	6		
Держатель твэл	6,8	5,4		
Хвостовик	2,3	1,2		

В результате проведенного анализа напряженнодеформированного состояния установлено, что демпфер за счет упругопластической деформации практически полностью гасит кинетическую энергию каретки при ее сходе по направляющей.

При этом величины относительной пластической деформации в элементах ТВС значительно снижаются.

Заключение

В заключении можно отметить, что проблема обеспечения прочности и целостности оборудования ядерных энергетических установок при динамических воздействиях высокой интенсивности при обосновании безопасности является весьма актуальной.

Реализованный в работе комплексный подход к выполнению расчетного анализа аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования, основан на соблюдении следующих принципов:

 – определение реальных сценариев постулируемых аварий на основании анализа конструкции транспортно-технологического тракта;

 построение расчетных моделей исследуемых конструкций, отражающих реальные жесткостные и весовые характеристики, обеспечивающих получение достоверных результатов;

 использование современных высокопроизводительных аттестованных конечно-элементных вычислительных комплексов расчета НДС и прочности конструкций объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), позволяющих учитывать интенсивные воздействия ударного характера;

 выполнение, нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ, содержащих радиоактивные материалы, применительно к случаям постулирования их аварийных падений.

Использование такого подхода позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций ОИАЭ, и на этой основе избежать дорогостоящих натурных испытаний, что способствует повышению конкурентоспособности изделий за счет снижения их себестоимости.

Литература

1. НП-061-05 Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии.

2. Тимофеев А. В., Кайдалов В. Б., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. Применение расчетного комплекса ANSYS\LS-DYNA в анализе аварий, связанных с падением оборудования ЯЭУ, // XIV Нижегородская сессия молодых ученых «Технические науки», 15–19 февраля 2009 г. Сборник тезисов докладов. г. Н. Новгород, Нижегородский НИЦ, 2009. С. 86.

3. Кайдалов В. Б., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. Моделирование ударных процессов при проектировании оборудования обращения с топливом реакторных установок типа БН. VIII научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Аннотации докладов. Нижегородская область, г. Саров, 2009.

4. Баженов В. Г., Кибец А. И., Кибец Ю. И. Лаптев П. В., Рябов А. А., Романов В. И., Сотсков Г. И. Конечно-элементный анализ высокоскоростного удара о преграду транспортного упаковочного комплекта // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 118–125.

5. Кибец А. И., Кибец Ю. И., Матвеев В. З. Численное моделирование динамического деформирования контейнера при аварийном падении на него плиты/Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. Межвуз. сб. Москва. Товарищество научных изданий КМК, 1997. С. 77–83.

6. Рябов А. А., Романов В. И., Сотсков Г. И., Скурихин С. Г., Барченков А. И., Моренко А. И. Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падениях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Механика. 2000. № 2. С. 98–102.

7. LS-DYNA Keyword user's manual. Version 970. Livermore Software Technology Corporation.

8. Виленский О. Ю., Лапшин Д. А., Рябцов А. В. Применение верифицированной расчетной модели

тепловыделяющей сборки реактора БН-800 для анализа последствий ее падения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып. 3. С. 187–198.

9. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Лапшин Д. А., Ламзин Д.А., Новосельцева Н. А., Татарский А. М., Татарский Ю. Н. Применение комплексного подхода к решению задач прочности элеватора реакторной установки БН-800 для аварийного случая схода каретки. Межвузовский сборник «Проблемы прочности и пластичности», № 80(1). г. Н.Новгород, 2018. С. 72–82.

10. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства № 327 от 18.04.2013.

11. Лапшин Д. А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением: Дисс... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2015.

12. Брагов А. М. Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации $10^2 - 10^5 c^{-1}$: Дисс.... докт. техн. наук. Нижегор. ун-т. 1998.

13. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic, The Hague, The Netherlands, 1983. P. 541–547.

14. Константинов А. Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дис... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2007.

15. Котов В. Л., Константинов А. Ю., Кибец Ю. И., Тарасова А. А., Власов В. П. Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Т. 75. № 4. С. 303-311.

16. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 1998.

МОБИЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАМНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

<u>Н. А. Трепалов,</u> С. И. Герасимов, Е. А. Гончаров, Е. А. Львова, Н. В. Нижегородцев, В. С. Роженцов, К. В. Тотышев

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

При проектировании и отработке современного ракетно-артиллерийского вооружения важную роль играет экспериментальная отработка в наземных условиях. При этом возрастают требования к информативности и достоверности получаемых экспериментальных данных. Это обуславливает необходимость совершенствования приборов, методов регистрации и измерений. Особое внимание представляют оптические методы регистрации быстропротекающих процессов, обладающие рядом преимуществ: бесконтактность, т. е. получение информации без внесения искажений в исследуемую область; возможность получения информации в большом поле исследуемого течения, в том числе и трехмерной картины регистрируемого параметра.

Для решения задач оптико-физической регистрации быстропротекающих процессов в лабораторных и полигонных условиях разработан экспериментальный образец мобильного аппаратно-программного комплекса оптико-физических измерений (МАПК ОФИ). МАПК ОФИ состоит из двух высокоскоростных видеокамер, системы запуска и хронографии, геодезического оборудования, системы автономного электропитания, средство транспортировки – «Газель NEXT» (рис. 1).

Одной из задач которую решает МАПК ОФИ является измерение параметров воздушной ударной волны (ВУВ) созданной при подрыве заряда взрывчатого вещества (состава). Под измеряемыми параметрами ВУВ подразумеваются: R-t диаграмма, скорость распространения фронта ВУВ; избыточное давление во фронте ВУВ. Для визуализации фронта ВУВ применяется теневой фоновый метод [1] с последующей обработкой полученной информации по [2]. МАПК ОФИ позволяет проводить регистрацию в лабораторных и полигонных условиях.



Рис. 1. МАПК ОФИ на полигоне

На рис. 2 представлены результаты, полученные при проведении регистрации в лабораторных условиях, где были оптимальным образом подобраны параметры схемы оптической регистрации с целью визуализации ВУВ малой интенсивности (~ 20 кПа). В эксперименте проводилось инициирование светочувствительного состава ВС-2 массой ~ 0,1 г, помещенного в латунный колпачок, лучом лазерного диода [3].

На рис. 3 приведены результаты, полученные при проведении регистрации в полигонных условиях. Проводилась регистрация процесса взрыва заряда шарообразной формы ($d_0 = 50$ мм) взрывчатого состава ПВВ-7 массой 100 г, расположенного на высоте 2,5 м. Регистрация осуществлялась с расстояния 29 м от места установки заряда.



Рис. 2. Результаты визуализации: 1 – фронт ВУВ; 2 – продукты взрыва; 3 – осколок



Рис. 3. Фрагмент видеорегистраци процесса взрыва заряда ПВВ-7

Для верификации МАПК ОФИ в области измерения параметров ВУВ был проведен сравнительный эксперимент. С помощью двух независимых методик измерений производилась регистрация параметров ВУВ от наземного взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Испытание проводилось на приборном поле (ПП), оборудованном пьезокварцевыми преобразователями давления (ППД). ППД устанавливались на четырех взаимно перпендикулярных лучах №№ 1, 5, 9, 11 на расстояниях 3, 4, 5, 7, 10 и 12 м от центра приборного поля (рис. 4). Регистрация информации с ППД производилась многоканальным комплексом MIC-553.

С помощью МАПК ОФИ производилась видеорегистрация процесса взрыва. Видеорегистрация осуществлялась с помощью двух высокоскоростных видеокамер, расположенных на расстоянии ~ 40 м от места установки заряда ВВ. Запуск регистрирующего оборудования осуществлялся автономно с помощью фотоприемного устройства (ФПУ), предназначенного для регистрации импульсного светового потока и формирования синхронизирующего электрического сигнала (рис. 4).

Источником формирования ВУВ являлся заряд, состоящий из пяти тротиловых шашек массой 0,2 кг каждая. Заряд устанавливался в центре ПП на деревянном столе-подставке высотой 0,2 м (рис. 5). Инициирование заряда осуществлялось от электродетонатора ЭД-8.

Определение параметров ВУВ по информации с ППД осуществлялось по методу обеспечивающему расчет максимального значения избыточного давления во фронте ВУВ (ΔP_{ϕ}) по его скорости с точностью 5 %.



Рис. 4. Схема расположения регистрирующего оборудования



Рис. 5. Расположение и внешний вид заряда ВВ

С помощью МАПК ОФИ получена последовательность кадров процесса взрыва (рис. 6а). С целью визуализации ВУВ от взрыва заряда ВВ полученная видеоинформация была обработана с помощью специального программного обеспечения по алгоритму [2]. Результатом обработки является серия изображений ВУВ в дискретные моменты времени относительно начала процесса взрыва (рис. 6б). По последовательности полученных изображений ВУВ с учетом схемы оптической регистрации определены параметры ВУВ.

Результаты измерений параметров ВУВ с помощью МАПК ОФИ и ППД представлены на рис. 7.



Рис. 6. Изображения с видеокамеры № 2: а – фрагмент видеорегистрации; б – визуализация ВУВ



Рис. 7. Сравнение результатов измерения: 1 – результаты, полученные с помощью МАПК ОФИ (видеокамера № 2); 2 – данные, полученные на основании регистрации информации с ППД, расположенных на луче № 1; 3 – ППД луч № 5; 4 – ППД луч № 9; 5 – ППД луч № 11; 6 – средние значения по данным с ППД

В случае взрыва заряда несферической формы, расположенного на некоторой высоте над поверхностью, образованная ВУВ имеет сложную форму, что демонстрируют результаты видеорегистрации (см. рис. 6). Несферичность ВУВ означает пространственно-угловую анизотропию перепада давления по поверхности ударного фронта. Данное обстоятельство подтверждается результатами измерений параметров ВУВ, сделанными в различных точках пространства (рис. 7).

Результаты видеорегистрации распространения фронта ВУВ позволяют определить изменение параметров ВУВ в интересующем направлении. Для получения детальной информации об интенсивности ВУВ в области регистрации было выбрано пять лучей (рис. 8), вдоль которых определены значения ΔP_{ϕ} . Полученные результаты (рис. 9) показывают существенное различие в данных по лучам. На начальном этапе интенсивность ВУВ в вертикальном направлении значительно выше остальных направлений. С течением времени, по мере приближения формы ВУВ к полусфере, разница интенсивности ВУВ по различным направлениям уменьшается.

Путем усреднения данных ОФИ по двум видеокамерам и пяти лучам для каждой видеокамеры получена обобщенная зависимость $\Delta P_{\phi}(R)$ (10). Степень расходимости результатов независимых измерений с помощью ППД и ОФИ (обобщенная зависимость) в области общей зоны регистрации (2,9–7,7 м) не превышает 5 %, что находится в диапазоне погрешности измерений используемых методик (7 %).



Рис. 8. Деление области видеорегистрации



Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных: ОФИі – значения, полученные по результатам видеорегистрации (і – номер луча в соответствии с рис. 8); ППДі – данные, полученные на основании регистрации информации с ППД, расположенных на луче № і



Рис. 10. Сравнение результатов измерений:1 – результаты ОФИ (средние значения); 2 – средние значения полученные на основании регистрации информации с ППД

Экспериментальные данные показывают существенную (более 50 %) пространственно-угловую анизотропию перепада давления по поверхности ударного фронта на начальном этапе распространения ВУВ (~3 м). Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке энергетики взрыва по результатам измерения параметров ВУВ.

МАПК ОФИ позволяет оперативно прибыть к месту проведения работ и после его развертывания проводить автономную работу. Регистрация осуществляется дистанционно и на безопасном расстоянии, что обеспечивает сохранность регистрирующего оборудования. Результатом регистрации является наглядная качественная картина распространения ВУВ, доступная сразу после проведения регистрации. На основании полученных данных производится определение параметров ВУВ. При условии многоракурсной видеорегистрации возможно получить полную (трехмерную) картину распространения ВУВ.

Литература

1. Герасимов С. И., Трепалов Н. А. Теневой фоновый метод – оптический метод исследования ударных волн // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 12. С 1802–1807.

2. Способ визуализации оптических неоднородностей: пат. 2621620 Рос. Федерация. № 2015144660 ; заявл. 16.10.15; опубл. 06.06.17, Бюл. № 16.

3. Герасимов С. И., Илюшин М. А., Кузьмин В. А. Возможность инициирования полимерсодержащего энергонасыщенного состава комплексного перхлората ртути лучом лазерного диода // ПЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 7. С. 66–72.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ ОБЪЕКТА ВОЗМУЩЕНИЙ

Ю. В. Уткина, О. А. Баулин

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

Расчет параметров головной ударной волны (ГУВ) на больших расстояниях от гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) является актуальной задачей и имеет широкое прикладное значение. Результаты таких расчетов могут применяться, например, для оценки безопасных расстояний при проектировании конструкций, находящихся в зоне пролета ГЛА, оценки воздействия ГУВ от пролета ГЛА на окружающую среду и т. д.

Основная проблема расчета параметров ГУВ на большом удалении от объекта возмущений заключается в разномасштабности задачи: необходимости построения расчетной области с габаритными размерами, многократно превышающими характерные размеры обтекаемого объекта.

В классических задачах аэродинамики расчетная сетка «сгущается» в окрестности обтекаемого объекта. В данном же случае для достаточного разрешения расчетной сеткой ГУВ на больших расстояниях от обтекаемого объекта необходима «густая» сетка в расчетной области, значительно превышающей характерные размеры этого объекта. Это приводит к значительному увеличению требуемого количества ячеек и, соответственно, ресурсоемкости расчета, что делает практически невозможным проведение расчета не только на ПЭВМ, но и, в отдельных случаях (при больших удалениях), на супер-ЭВМ.

Решением этой проблемы может служить использование расчетных областей сложной формы, и расчетной сетки максимально адаптированной под форму ГУВ, что позволяет максимально сократить число ячеек расчетной сетки.

Для решения этой задачи использован современный ПК ЛОГОС разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», позволяющий проводить расчеты трехмерных задач в широком диапазоне скоростей обтекания и в многопроцессорном режиме.

С использованием средств ПК ЛОГОС построена расчетная сетка и проведен расчет обтекания сферически затупленного конического объекта (см. рис. 1) при скорости набегающего потока $V_{\infty} = 4130$ м/с и давлении $P_{\infty} = 101325$ Па.



Рис. 1. Обтекаемый объект

По результатам предварительных расчетов на грубых расчетных сетках определена приблизительная форма ГУВ, которая была использована для построения расчетной области конической формы, внешняя поверхность которой несколько отстоит от ГУВ. Так как задача осесимметричная для сокращения числа ячеек выбран сектор с углом раствора 30° (см. рис. 2). На плоских гранях расчетной области заданы условия симметрии, что позволяет проводить расчет в трехмерной постановке.



Рис. 2. Расчетная область

На рис. 3 представлена расчетная сетка сложной формы, которая содержит 3 млн. ячеек, что делает возможным проведение расчета на ПК.



Рис. 3. Расчетная сетка

В результате расчета определены геометрические характеристики ГУВ и избыточное давление ΔP при переходе через ГУВ на различных расстояниях от оси ОИ: 200, 300, 500, 600 мм (см. рис. 4).



Рис. 4. Схема вывода результатов решения

Поле давления в расчетной области приведено на рис. 5.

Зависимости изменения давления при переходе через ГУВ от расстояния до оси ОИ приведены на рис. 6.

Из анализа рис. 5, 6 следует, что при удалениях от оси ОИ 500-600 мм фронт ГУВ несколько «размазывается» (пик графика на рис. 6 не острый), что обусловлено не достаточно подробной расчетной сеткой на этих расстояниях, и приводит к некоторому занижению (~5-10 %) расчетных значений.

В таблице приведены максимальные значения избыточного давления при переходе через ГУВ на различных расстояниях от оси ОИ.

Таким образом, ПК ЛОГОС обладает развитым функционалом, позволяющим строить расчетные

сетки максимально адаптированные под условия задачи и проводить расчеты гиперзвукового обтекания при экстремальных значениях температур и давлений газа. В дальнейшем планируется провести расчеты параметров ГУВ на расстояниях > 800 мм от оси обтекаемого объекта и верификацию результатов на экспериментальных данных.

Избыточное давление при переходе через ГУВ

ΔL , мм	$\Delta P * 10^4$, Па
200	7,2
300	4,3
500	2,6
600	2,1



Рис. 5. Поле давления в расчетной области



Рис. 6. Зависимость давления (P) от расстояния (x)

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ, ГОРЕНИЯ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ И ПРОГРЕВА КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА В СВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

О. А. Баулин, Р. Н. Жучков, М. В. Заузолков, П. А. Машенькин, <u>К. Н. Шавлач</u>

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

Введение

Особенностью полета гиперзвукового летательного аппарата (ГЛА) является движение в условиях воздействия интенсивного конвективного теплового потока, вызывающего разогрев и разрушение теплозащитного покрытия. Поэтому разработка ГЛА всегда сопряжена с экспериментальной отработкой их габаритных макетов и образцов теплозащитных материалов.

В настоящее время для моделирования натурных условий теплового нагружения макетов ГЛА в наземных условиях используются установки различных типов (плазмотроны, установки на базе электродуговых подогревателей. твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей и т. д.). Одним из широко распространенных способов создания теплового нагружения на макеты ГЛА является использование тепломеханических стендов (ТМС), работающих на принципе сжигания смеси газов кислорода и водорода. Кислородо-водородные ТМС, как правило, оснащаются камерой сгорания (КС), в которую подаются компоненты горючей смеси. Регулирование параметров смеси осуществляется посредством подбора сменных расходомерных шайб на входе в КС и настройки газовых редукторов на нужное давление.

Эксплуатационные параметры ТМС могут быть выбраны исходя из режима нагружения, требуемого для конкретной задачи, и, в том числе, для режима максимальных аэротермомеханических нагрузок. Для успешной эксплуатации ТМС необходимо расчетное обоснование режимов его работы, которое, в основном, заключается в следующем: определение зависимости между различным соотношением рабочих параметров (давлением газов, диаметрами расходомерных шайб) и газодинамическими параметрами продуктов сгорания (давление, плотность, температура, скорость, стехиометрический состав);

2) определение области допустимых режимов работы, при которых обеспечивается сохранность камеры сгорания (КС) ТМС (в том числе с целью недопущение перегрева и выхода из строя дорогостоящей матчасти).

Выбор и обоснование эксплуатационных параметров ТМС предполагается проводить с использованием численного моделирования. Для проведения численного моделирования газодинамических и химических процессов в КС использован современный ПК ЛОГОС, разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Описание процессов смесеобразования (перемешивания газов), горения и формирования струи продуктов сгорания внутри КС представляет сложную научно-техническую задачу, от решения которой зависит совершенство конструкции ТМС и безопасность проводимых исследований.

В данном докладе представлены результаты одного варианта расчета, с целью демонстрации возможностей используемого программного комплекса и выявления общих закономерностей протекающих процессов.

Исходные данные

Эскиз и трехмерная модель КС ТМС представлены на рис. 1 и 2, соответственно [1].



Рис. 1. Эскиз КС ТМС (заявка RU 2018106185 приоритет 19.02.2018)



Рис. 2. Трехмерная модель КС ТМС

Для проведения расчета выбраны следующие рабочие параметры:

— давление кислорода O_2 на входе в КС — 8,7 атм.

– давление водорода H_2 на входе в КС – 4 атм.

– диаметры расходомерных шайб – 20 мм (одинаковые для O_2 и H_2).

Расчеты проведены в нестационарной связанной постановке: в модуле ЛОГОС-Аэрогидромеханика рассчитывается смешение и горение рабочих газов в КС и истечение продуктов сгорания, а в модуле ЛОГОС-Тепломассоперенос – распространение тепла от внутреннего объема по конструкции КС и отвод тепла с ее поверхности. При этом процесс горения зависит от температуры стенки КС, а подводимая к ней теплота – от температуры продуктов сгорания. При проведении расчетов разветвленноцепные реакции не учитывали. За основу принята основная простая реакция горения водорода в кисло-

роде:
$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$$
.

На рис. 3 представлены использованные расчетные модели.



Рис. 3. Расчетные модели: а – модель для расчета смешения и горения рабочих газов в ЛОГОС-Аэрогидромеханика (форма повторяет внутренний обвод КС); б – модель для расчета прогрева конструкции КС в ЛОГОС-Теплопередача

На моделях построены расчетные сетки, представленные на рис. 4–5. Общее количество ячеек для газодинамической задачи, решаемой модулем ЛОГОС-Аэрогидромеханика, составило ~ 2 млн., для задачи теплообмена, решаемой ЛОГОС-Тепломассоперенос, ~ 1,1 млн.



Рис. 4. Расчетная сетка, использованная в ПК ЛОГОС для газодинамической задачи: а – продольное сечение; б – поперечное сечение (в месте подвода рабочих газов)



Рис. 5. Расчетная сетка, использованная в ПК ЛОГОС для задачи теплообмена: а – трехмерная модель; б – продольное сечение

Численное моделирование в части смешения и горения рабочих газов

Результаты расчетов газодинамической части задачи представлены в виде полей концентраций кислорода O_2 , водорода H_2 и паров воды H_2O в разные моменты времени в четырех поперечных сечениях с шагом 100 мм (см. рис. 7). Схема расположения сечений представлена на рис. 6.

Дополнительно поля концентраций кислорода и водорода в КС ТМС представлены в объемном виде на рис. 8–9.



Рис. 6. Схема расположения поперечных сечений



Рис. 7. Поля концентраций в поперечных сечениях в разные моменты времени: а – кислорода (O_2), б – водорода (H_2), в – паров воды (H_2O)



Рис. 8. Поле концентрации кислорода



Рис. 9. Поля концентрации водорода

На рис. 10 представлены линии тока в объеме камеры сгорания.



Рис. 10. Линии тока в объеме КС

Из анализа рис. 7-10 следует:

- происходящие в КС газодинамические и химические процессы существенно не стационарны, так как установление постоянного стехиометрического состава смеси в рассмотренных сечениях не происходит. Возможно, это связано с тем, что при выбранных величинах давлений и диаметрах расходомерных шайб струя кислорода «перебивает» струю водорода, препятствуя ее выходу в КС (см. концентрации реагентов). Таким образом, горение происходит непосредственно в окрестности подвода водорода во внутренний объем КС. Так как скорость протекания реакции больше скорости подвода водорода при данном давлении, то водород сгорает порциями, при этом реализуется импульсный режим работы ТМС. Из изложенного следует, что для реализации стационарного режима работы ТМС необходимо использование других соотношений давлений и расходомерных шайб.

– весь подводимый водород сгорает в окрестности зоны его подвода в объем КС, не достигая выхода из сопла, так как концентрация водорода в основном ее объеме равна нулю.

 течение в камере сгорания имеет значительную радиальную составляющую скорости.

На рис. 11 представлено поле давления газа в КС ТМС через 10 с после запуска установки.



Рис. 11. Поле давления в КС ТМС

Давление возле стенок КС несколько превышает давление в центральной части, что обусловлено высокой радиальной составляющей скорости (V_{R} max ≈ 800 м/с). Кроме того давление продуктов сгорания в зоне подвода водорода (внутри КС) оказывается соизмеримым с давлением водорода на входе в КС, что затрудняет выход водорода, его активное смешение с кислородом и в результате локализует зону горения непосредственно в окрестности его подвода к КС. При этом тепловые нагрузки на конструкцию КС локализуются в этой же зоне и приводят к резкому нагреву стенки. Расход рабочих газов в таком режиме неэффективен, так как ~ 60% кислорода выходит из КС не прореагировав с водородом.

Численное моделирование в части прогрева камеры сгорания

Результаты расчета прогрева конструкции КС представлены в виде полей температуры в разные моменты времени (см. рис. 12).

Зависимость температуры, реализующейся на внутренней поверхности КС в нескольких характерных точках конструкции (см. рис. 13), от времени работы ТМС представлена на рис. 14.



Рис. 12. Поле температур в двух половинах КС (со стороны подвода H_2 – слева и со стороны подвода O_2 – справа) в разные моменты времени



Рис. 13. Схема расположения точек



Рис. 14. Зависимость температуры на внутренней поверхности КС от времени
КС состоит их трех основных частей: блока подвода рабочих газов, выполненного из нержавеющей стали, цилиндрической медной части и стального сопла. Из анализа рис. 14 следует, что максимальная температура реализуется в первой части (точка 4 на рис. 13). Таким образом, максимальное безопасное время работы ТМС будет определяться максимальной рабочей температурой нержавеющей стали.

Заключение

В результате расчета определено, что:

 происходящие в КС газодинамические и химические процессы существенно не стационарны, что определяется неоптимальными параметрами, выбранными для расчета; 2) процесс горения не распространяется по большей части объема КС, а локализован в окрестности места подвода водорода, что приводит к переизбытку кислорода на выходе из КС и неблагоприятно сказывается на тепловых режимах блока подвода рабочих газов.

На примере решения задачи смешения и горения газов в КС ТМС с использованием выбранных эксплуатационных параметров, продемонстрированы возможности программного комплекса ЛОГОС по решению задач данного класса. Визуализированы и проанализированы результаты решения, показаны основные закономерности протекающих физических процессов.

Выбор эксплуатационных параметров ТМС зависит от условий конкретных задач и может быть осуществлен по результатам серии подобных оптимизационных расчетов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЫРОЧНЫХ ЛОВУШЕК В ЗАХОРОНЕННОМ ОКСИДЕ СТРУКТУР КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ МЕТОДАМИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПУЛА-ФРЕНКЕЛЯ И ИНЖЕКЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

В. А. Герасимов, С. И. Суродин, <u>А. А. Ширяев</u>, Е. Л. Шоболов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Одной из основных причин ограничения дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе структур кремний-на-изоляторе (КНИ) является образование паразитного проводящего канала в п-канальных транзисторах на границе с захороненным оксидом структуры КНИ, представляющим собой термический диоксид кремния. Этот канал индуцируется положительным зарядом дырок, образующихся в оксиде в результате ионизации и захватывающихся на ловушки, представляющие собой точечные дефекты с глубокими уровнями в запрещенной зоне диоксида кремния. В связи с этим с целью прогнозирования радиационной стойкости микросхем, определения требований к уровню дефектности захороненного оксида и анализа его влияния на радиационную стойкость микросхем необходима разработка методов контроля параметров этих ловушек (их концентрации, сечения захвата и пространственного распределения).

Основной метод, широко освещенный в научных публикациях [1-6], заключается в измерении радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения донного паразитного транзистора или напряжения плоских зон структуры КНИ – величин, напрямую определяющихся данными параметрами ловушек. Однако разработка альтернативных методов, особенно неразрушающих, не использующих ионизирующее излучение, может открыть новые возможности в области контроля качества и обеспечения радиационной стойкости полупроводниковых приборов. Такой метод может найти применение, например, для повышения точности моделирования радиационной стойкости микросхем, оптимизации процесса изготовления структур КНИ, обеспечения применения специальных технологических методов предотвращения образования паразитного канала, а также отбраковки структур КНИ. Обзору таких методов посвящена работа [7]. В работе [8] в качестве наиболее перспективного предложен метод на основе эффекта Пула-Френкеля.

Эффект Пула–Френкеля заключается в следующем. Электроны под действием температуры и электрического поля эмитируются с донорных уровней в зону проводимости диэлектрика. Влияние электрического поля проявляется в уменьшении энергетического барьера для электронов на донорных уровнях. При этом зависимость плотности тока диэлектрика от напряженности электрического поля в нем устанавливается следующей формулой:

$$J = q\mu E N_D(T, E), \tag{1}$$

где q – элементарный заряд; μ – подвижность электронов в диэлектрике (20 см²/(B·c) – в случае термического диоксида кремния [9]); $N_D(T,E)$ – концентрация ионизированных донорных центров в диэлектрике, зависящая от температуры T и напряженности поля E по следующей формуле:

$$N_D = N_C \exp\left(-\frac{q\phi - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon}}}{kT}\right),$$
 (2)

где N_C – плотность квантовых состояний в зоне проводимости диэлектрика (примерно $1,5 \cdot 10^{23}$ см⁻³ – в случае термического диоксида кремния [10]); φ – уровень донорных центров в диэлектрике (относительно дна зоны проводимости); ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; k – постоянная Больцмана.

В результате выполнения предыдущей работы [8] были сделаны следующие выводы. В термическом диоксиде кремния в низких полях наблюдается омический механизм электропроводности, а в высоких – механизм Фаулера–Нордгейма. Эффект Пула-Френкеля в термическом диоксиде кремния наблюдается при напряженностях электрического поля от 5 до 10 MB/см во всем исследованном диапазоне температур от 300 до 400 K, как при толщине 30 нм, так и при толщине 150 нм.

При этом удалось получить следующую информацию: энергетическое положение дырочных ловушек в запрещенной зоне диэлектрика (2,34 эВ), соответствующее уровню вакансии кислорода (Е'_γ-центру), и концентрацию ионизированных дырочных ловушек (10⁹ см⁻³) при определенной температуре и определенной напряженности поля.

Цель настоящей работы – определение концентрации и энергетического положения дырочных ловушек в захороненном оксиде. Для этого были применены метод на основе эффекта Пула–Френкеля и метод на основе инжекции носителей заряда, который использовался в качестве имитации радиационного воздействия для обоснования возможности применения метода на основе эффекта Пула-Френкеля для прогнозирования радиационного накопления заряда в захороненном оксиде.

Методика эксперимента

Образцами исследований являлись три тестовых р-канальных кольцевых транзистора с длиной канала 6 мкм и шириной канала 80 мкм с толщиной подзатворного термического диоксида кремния 35 нм. При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) подзатворного диэлектрика (при температурах 295 и 423 К) исток, подложка и сток заземлялись, а на затвор подавалось напряжение от 0 до 30 В с шагом 100 мВ. При измерении входных ВАХ транзисторов исток и подложка заземлялись, на сток подавалось напряжение –100 мВ, а на затвор подавалось напряжение от 0 до -3 В с шагом -10 мВ. Инжекция носителей заряда в подзатворный диэлектрик тестовых МОП-транзисторов проводилась в следующем режиме. Исток, подложка и сток заземлялись, а на затвор подавалось напряжение 28 В (соответствующее напряженности в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 5 часов при температуре 423 К.

Инжекция проводилась также на двух МОПконденсаторах с площадью обкладок $100 \times 100 \text{ мкm}^2$ и толщиной подзатворного диэлектрика 30 нм, сформированных на низколегированной п-подложке. Использовались следующие режимы: подложка заземлялась, на верхнюю обкладку подавалось напряжение +24 и -24 В (соответствующее напряженности в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 30 минут при температурах 295 и 473 К. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) конденсаторов измерялись при заземленной подложке, напряжении от 6 до -6 В с шагом -10 мВ на верхней обкладке, частоте 1 МГц, амплитуде измерительного сигнала 10 мВ.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) подзатворного диэлектрика, измеренные до и после проведения инжекции, и смоделированная характеристика по формулам (1) и (2) с указанием рассчитанных концентраций и энергетического положения ловушечных центров, участвующих в проводимости Пула–Френкеля. При комнатной температуре (295 К) была получена концентрация центров 7,8·10⁵ см⁻³, а уровень энергии составил 2,53 эВ. При температуре 423 К соответствующие значения составили 8,29·10⁵ см⁻³ и 2,95 эВ. После проведения инжекции концентрация ловушек снизилась до значения 3,6·10¹¹ м⁻³ при энергии 2,55 эВ. Все концентрации были рассчитаны для значения напряженности 8,6 MB/см.



Рис. 1. ВАХ подзатворного диэлектрика и смоделированная характеристика

На рис. 2 приведены входные ВАХ одного из исследованных МОП-транзисторов до и после проведения инжекции.

В таблице представлены концентрации участвующих в проводимости Пула-Френкеля дырочных ловушек при температуре 423 К и напряженности 8,6 МВ/см для трех образцов подзатворного термического диоксида кремния и соответствующие сдвиги порогового напряжения тестовых транзисторов после проведения инжекции.



Рис. 2. Входные ВАХ исследованного МОП-транзистора до и после проведения инжекции при температуре 150 °C в течение 5 часов при напряжении на затворе 28 В

Сравнение концентраций участвующих в проводимости Пула-Френкеля центров при температуре 423 К и напряженности 8,6 МВ/см и сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов после проведения инжекции

Номер образца	Концентрация ловушек, 10 ⁵ см ⁻³	Сдвиг порогового напряжения, В (при I _D = 1 мкА)
1	18,9	-0,54
2	8,29	-0,50
3	14,3	-0,72

В данной работе также была проведена инжекция носителей заряда в подзатворный термический диоксид кремния тестовых МОП-конденсаторов при разных температурах и полярностях.

Измеренные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) до и после инжекции показаны на рис. 3. Оценка концентрации дырочных ловушек проводилась по следующей формуле:

$$N_D = \frac{Q}{q} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q},\tag{3}$$

где Q – заряд в диэлектрике, накопленный в результате инжекции дырок; ΔV_{FB} – сдвиг напряжения плоских зон (определяемого как напряжение максимума первой производной ВФХ) в результате инжекции дырок (после инжекции электронов); C_{ox} – емкость диэлектрика. Величина N_D составила 7.3 · 10⁹ см⁻³.



Рис. 3. Высокочастотные ВФХ тестовых МОП-конденсаторов до и после проведения инжекции при температуре 473 К в течение 30 минут при напряжении на верхней обкладке 24 В (electron injection) и –24 В (hole injection)

Обсуждение полученных результатов

Из рис. 1 видно, что с повы шением температуры количество центров в диэлектрике, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, растет, что соответствует формулам (1) и (2). Однако интересным выглядит тот факт, что концентрация ионизированных центров уменьшается после проведения инжекции. Для объяснения этого явления следует провести дополнительные исследования. Расчет концентраций проводился для значения напряженности 8,6 MB/см, потому что выше этого значения наблюдался пробой диэлектрика.

Из рис. 2 видно, что сдвиг порогового напряжения р-канального транзистора наблюдается в отрицательную сторону, что соответствует инжекции дырок в диэлектрик. Однако, судя по тому, что нижняя часть характеристики не смещается, а изменение порогового напряжения (на токе 1 мкА) происходит только за счет изменения подпорогового наклона, можно сделать вывод, что инжекции носителей не происходит, а имеет место образование поверхностных состояний на границе диэлектрика.

Несмотря на это, в данной работе было проведено сравнение рассчитанных концентраций дырочных ловушек диэлектрика, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, и сдвига порогового напряжения транзисторов после возможной инжекции (таблица). Как и следовало ожидать, зная, что имеет место только накопление поверхностных состояний, зависимости между этими величинами не было обнаружено.

Явление инжекции носителей заряда в термический диоксид кремния было обнаружено при исследовании МОП-конденсаторов (рис. 3). Здесь помимо изменения наклона ВФХ, свидетельствующего о накоплении поверхностных состояний, ясно виден сдвиг ВФХ вправо (при инжекции электронов из кремния – нижней обкладки) и затем влево (при инжекции дырок из кремния). Учитывая то, что напряженность поля в диэлектрике при исследовании и МОП-транзисторов, и МОП-конденсаторов была одинаковая (8 МВ/см), а сдвиг ВФХ конденсаторов наблюдался как при температуре 473 К, так и при 295 К, можно сказать, что присутствие явления инжекции носителей заряда в диэлектрик определяется конструкцией тестовой структуры.

Значение концентрации дырочных ловушек, измеренное с помощью инжекции дырок, оказалось на несколько порядков выше, чем значение, измеренное методом на основе эффекта Пула–Френкеля. Это говорит о том, что процесс зарядки дырочных ловушек при инжекции дырок в диэлектрик отличается от процесса зарядки при проводимости Пула–Френкеля и является более интенсивным.

С точки зрения прогнозирования радиационноиндуцированного накопления заряда в захороненном оксиде структур КНИ можно сделать следующие выводы. Для того чтобы зафиксировать большее количество дырочных ловушек в диэлектрике, следует проводить измерения проводимости Пула-Френкеля при повышенной температуре и повышенной напряженности поля (избегая пробоя диэлектрика и проводимости Фаулера-Нордгейма). Инжекцию носителей заряда для оценки концентрации дырочных ловушек в захороненном оксиде следует проводить на тестовых МОП-конденсаторах, образованных структурой КНИ. Следует провести дополнительные исследования корреляции концентрации дырочных ловушек, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, и инжектированного заряда в захороненном оксиде структуры КНИ. Метод на основе инжекции (имитация радиационного воздействия) благодаря большему количеству задействованных дырочных ловушек может позволить более адекватно прогнозировать радиационное накопление заряда в захороненном оксиде, чем метод на основе эффекта Пула-Френкеля. В то же время метод на основе эффекта Пула-Френкеля в отличие от метода на основе инжекции является неразрушающим.

Заключение

В данной работе методом на основе эффекта Пула–Френкеля определены значения концентрации и энергетическое положение дырочных ловушек в термическом диоксиде кремния. Для имитации радиационного воздействия проведена инжекция носителей заряда в термический диоксид кремния при разных условиях: различные тестовые структуры, разные температуры, продолжительности инжекции, полярности. Произведена оценка концентрации дырочных ловушек на основе полученных при проведении инжекции экспериментальных данных. Полученные результаты рассмотрены с точки зрения прогнозирования радиационного накопления заряда в захороненном оксиде структур КНИ.

Литература

1. Ouisse T., Cristoloveanu S., Borel G. Electron trapping in irradiated SIMOX buried oxides // IEEE Electron Device Letters. 1991. 12, 6. P. 312.

2. Pennise C. A., Boesch H. A. Determination of the charge-trapping characteristics of buried oxides using a 10-kev x-ray source. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1990. 37, 6. P. 1990–1994.

3. Stahlbush R. E., Campisi G. J., McKitterick J. B., Maszara W. P., Roitman P., Brown G. A. Electron and hole trapping in irradiated SIMOX, ZMR and BESOI buried oxides. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. 39, 6, P. 2086.

4. Гуськова О. П., Воротынцев В. М., Шоболов Е. Л., Абросимова Н. Д. Влияние германия, им-

плантированного в структуру «диоксид кремния на кремнии», на процессы накопления заряда при воздействии низкоэнергетического стационарного ионизирующего излучения // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2012. 4, 60. С. 28–32.

5. Николаев Д. В., Антонова И. В., Наумова О. В., Попов В. П., Смагулова С. А. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и γ-квантами // Физика и техника полупроводников. 2003. 37, 4. С. 443–449.

6. Аскинази А. Ю., Барабан А. П., Дмитриев В. А., Милоглядова Л. В. Энергетическое положение электрически активных центров в окисном слое SIMOXструктур // Письма в ЖТФ. 2002. 28, 23. С. 23–29.

7. Ширяев А. А., Шоболов Е. Л., Герасимов В. А. Методы экспериментального исследования дырочных ловушек в захороненном оксиде структур «кремний на изоляторе» // В сб.: ХХІ Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: материалы докладов / Под ред. И. А. Зверевой. Княгинино, НГИЭУ. 2016. С. 105.

8. Ширяев А. А., Воротынцев В. М., Шоболов Е. Л. Эффект Пула–Френкеля и возможность его применения для прогнозирования радиационного накопления заряда в термическом диоксиде кремния. Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 9. С. 990–994.

9. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

10. Sevik C., Bulutay C. Theoretical study of the insulating oxides and nitrides. Journal of Materials Science. 2007. 42, 16. P. 6555.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОВЕРКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННЫХ ПРИБОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ (PDV)

<u>А. С. Шубин</u>, А. А. Тихов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Лазерно-гетеродинные приборные комплексы типа PDV широко применяются для регистрации скорости движения объектов в быстропротекающих процессах [1–3]. Для получения информации о скорости регистрируется линейно с ней связанная частота доплеровского сдвига, которую можно измерить в виде биений, возникающих при сложении сигнала с опорным излучением. Погрешность измерения частоты биений является ключевой характеристикой при разработке методик измерения, применяемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ.

Для подтверждения метрологических характеристик комплексов PDV используется поверочный стенд, разработанный во ВНИИА [4]. Стенд модулирует по амплитуде оптический сигнал, имитируя биения гетеродин-интерферометра. Частота данной модуляции устанавливается эталонным генератором колебаний. Сравнение установленной частоты генератора и измеренной частоты сигнала позволяет определить погрешность измерения частоты приборного комплекса. Данный стенд применяется в работах по поверке и калибровке комплексов ВНИИА и комплексов PDV, разработанных в ядерных центрах. Ближайшими аналогами среди средств поверки являются установки для поверки радиолокационных измерителей скорости движения транспортных средств работающих на схожих принципах [5, 6], в том числе с функциями полуавтоматической и автоматической поверки [7].

Процедура проведения поверки лазерно-гетеродинных приборных комплексов заключается в выполнении нескольких серий контрольных измерений во множестве точек равномерно распределенных по рабочему диапазону частот. В случае многоканального исполнения комплекса, количество необходимых измерений может достигать нескольких тысяч, что приводит к увеличению сроков поверки и повышает вероятность ошибки оператора.

Целью работы являлась автоматизация поверки многоканальных лазерно-гетеродинных приборных комплексов для сокращения сроков поверки и снижения нагрузки на оператора.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

 – составлена структура и алгоритм программы для управления составными частями стенда; – разработан перечень программных классов, представляющих собой модули управления составными частями стенда;

 – разработан программный код классов, включающий в себя протоколы информационного обмена и графический интерфейс пользователя;

выполнено объединение модулей в единую программную оболочку;

 проведено экспериментальное тестирование поверочного стенда с использованием разработанного программного обеспечения.

Комплексы PDV и поверочный стенд состоят из устройств, которые с помощью различных преобразователей интерфейсов могут быть объединены в одну локальную сеть для управления одним компьютером (рис. 1).

В стенде применен синтезатор частот Г7М-20А с диапазоном частот до 20 ГГц и относительной погрешностью установки частоты до ± 1·10⁻⁶. Синтезатор имеет возможность управления по локальной сети. Оптический модулятор из состава стенда требует поддержания линейного режима работы, что потребовало разработать автоматический драйвер контроля рабочей точки.

Любой приборный комплекс гетеродин-интерферометр PDV состоит из следующих устройств, требующих управления и контроля параметров в ходе поверки:

– лазеры, применяемые для создания опорного и зондирующего излучения, требуют поочередного или одновременного включения с заданными методикой поверки значениями мощности и отстройками по длинам волн. (Часто применяемые в разработках ВНИИА и РФЯЦ лазеры производства NKT Photonics требуют применения преобразователя интерфейса USB в Ethernet);

 оптические EDFA-усилители (контроль коэффициента усиления для поддержания требуемого уровня сигнала). Управление по локальной сети может быть организовано через преобразователь интерфейса RS-232 в Ethernet;

 осциллограф записывает сигнал с фотодетектора, производит математическую обработку (FFT преобразование) для измерения частоты сигнала и передает данные на управляющий компьютер.



Рис. 1. Схема автоматического управления оборудованием

Так как стенд поверочный имеет один канал, а количество оптических измерительных каналов в комплексах значительно выше, после выполнения серии измерений для одного канала требуется вручную произвести подключение следующего оптического канала. Для полной автоматизации процедуры поверки предложено использовать оптико-механический переключатель (оптический коммутатор), который также управляется по локальной сети через преобразователь интерфейсов.

Была разработана программа, реализующая (линейную незамкнутую [8]) систему автоматического управления процессом поверки приборного комплекса PDV (далее – программа автоматизации). Архитектура исходного кода данной программы организованна по модульному принципу, где для каждого типа устройства написан свой отдельный программный класс, что сильно упрощает процесс, как доработок уже существующих классов, так и разработку новых классов под новые устройства. Класс представляет собой набор функций/методов для обеспечения двустороннего информационного обмена с соответствующим устройством, а также графический интерфейс для двустороннего информационного обмена с оператором. Для автоматизации поверки приборных комплексов типа ТКПФ268 и ТКПФ268-01 реализованы следующие классы (далее по тексту – модули):

модуль управления усилителями лазеров (лазерами);

модуль мониторинга усилителей отраженного сигнала;

модуль управления осциллографами (графический интерфейс представлен на рис. 2);

модуль управления оптическим коммутатором; модуль управления синтезатором частот;

модуль консолидации управления всеми вышеупомянутыми классами (модулями) для реализации последовательной отработки сценария по методике поверки (графический интерфейс представлен на рис. 3).



Рис. 2. Модуль управления осциллографами

Согласно методике поверки поверителем при первичной настройке программы однократно вручную заполняется таблица сценариев, которая представляет собой последовательность действий, выполняемых программой (рис. 3).

Сценарий поверки формируется следующим образом:

- указывается последовательность каналов комплекса и значения частот, в которых будут проводиться контрольные измерения;

 задается номер канала осциллографа и номер лазера, отвечающие за данный канал комплекса (в случае если в комплексе применено несколько лазеров).

Алгоритм работы программы с таблицей приведен на рис. 4.

Ciapi inpogorocaria inay.	38	0	становя	ā	111	C	no	11				
Открыть/сохранить	xt								6	Очи	стить всё	×
Команда		Канал компл.	Часто	та,	Кан	ал	N лаэ	epa	Мош гени дБ	цн. ер. М	Текст для оператора	
Активация_динамических_параметров	٠	1	• 100		C1		1		13		1	
Троверка_всех_параметров	•	1	- 100		C1	•	1	•	13	•		
Тодтверждение_оператором_мощности	*		•									13
Запись_частоты_в_отчет	•		-	+		•		•		+		10
Активация_динамических_параметров	•	1	• 2500	•	C1	•	1	•	13	•		0
Проверка_всех_параметров	٠	1	- 2500	•	C1	•	1	٠	13			
Запись_частоты_в_отчет	-		•	-				+		•		
Активация_динамических_параметров	•	1	- 5000	•	C1		1		13			
Проверка_всех_параметров	٠	1	- 5000	•	C1		1	•	13	٠		10
Запись_частоты_в_отчет	•		•									
Активация_динамических_параметров	٠	1	- 7500	•	C1	•	1	•	13	•		
Проверка_всех_параметров	•	1	- 7500	•	C1		1	•	13	-		0
Запись_частоты_в_отчет	٠		•	٠		•		٠				1
Активания линамических папаметлов	+	1	+ 1000	• •	C1		1		13			171

Рис. 3. Модуль управления последовательной отработки сценария по методике поверки



Рис. 4. Алгоритм работы программы с таблицей сценария

После выполнения измерений программа заносит результаты в таблицу (рис. 5), которую затем можно сохранить или распечатать для формирования протокола поверки.

В мае 2018 г. в ходе поверки приборных комплексов ТКПФ268-01, находящихся в РФЯЦ-ВНИИТФ, была выполнена экспериментальная отработка программы. Результаты показали трехкратное ускорение процесса поверки (по сравнению с результатами предыдущих лет) и отсутствие ошибок, вызванных человеческим фактором (например, ошибка оптоволоконной коммутации каналов, дублирование или пропуски в последовательности точек регистрации частоты). После перенастройки модулей и сценария поверки программа может быть адаптирована под использование с комплексами PDV разработки РФЯЦ-ВНИИТФ и РФЯЦ-ВНИИЭФ.

	Подтвержи	ение мощности	Активация динам	. данных прото	жол	
	Номер канала	Установленнюе значение частоты Густ, МГц	Измеренное значение частоты Гизи, МГц	Расчетное значение разницы Fизи - Fyct, МГц	Расчетное значение относительной погрешности &F=(Гизм - Fyct)/Fyct, %	Сохранятт измерит. канал Сохранятт фФТ
	1	100.000	100.000	0.000	0.00	
запущен: 21.06.2018	1	100,000	100,000	0,000	0,00	
	1	2500.000	2499,999	-0,001	0,00	
	1	5000,000	4999,999	-0,001	0,00	
	1	7500,000	7499,998	-0.002	0.00	
	1	10000,000	9999,998	-0,002	0,00	Запросит
	2	100,000	100,000	0,000	0,00	измерени
	2	2500,000	2499,999	-0,001	0,00	pag
	2	5000,000	4999,999	-0,001	0,00	-
	2	7500,000	7499,999	-0,001	0,00	Далее

Рис. 5. Результаты поверки, занесенные в таблицу

В ближайшие годы в отрасли будут разработаны аттестованные методики измерений, построенные на применение многоканальных лазерно-гетеродинных приборных комплексов, которые закрепятся в качестве основных средств контроля и испытаний специзделий. Суммарное количество каналов комплексов PDV в ядерных центрах неуклонно растет и уже достигает нескольких сотен. Обеспечение единства измерений потребует метрологических испытаний оборудования и ежегодной поверки и калибровки. В данных условиях разработанный поверочный стенд и предложенный программно реализованный алгоритм автоматизации поверки будет востребован.

Литература

1. Bandurkin K. V., Kamenev V. G., Kaplyukov G. V., Kuratov S. E., Kondratyev A. N., Mikulin A. Y., Rogozkin D. B., Serezhkin A. A., Tikhov A. A., Tour I. V. "Experimental (Laser-Heterodyne Method PDV) and Numerical Investigation of the Movement of the Dispersed Phase", Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics 2015. V. 16 (4), http://chemphys.edu.ru/issues/ 2015-16-4/articles/550/.

2. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К. и др. Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 4. С. 115–121.

3. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А. и др. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударноволновом нагружении металлов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. Т. 149. № 4. С. 792–795.

4. Описание типа средства измерений «Стенд поверочный ТКПФ268-С1», ФГУП «ВНИИА», 2015, Регистрационный № 61619-15.

5. Описание типа средства измерений «Имитаторы скорости движения ИС-24», ООО «Симикон», 2004. Регистрационный № 19867-04.

6. Описание типа средства измерений «Установка для поверки измерителей скорости движения транспортных средств радиолокационных П1-25», ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012. Регистрационный № 49207-12.

7. Описание типа средства измерений «Стенд автоматизированный для испытания и поверки радиолокационных измерителей скорости «Сапсан 2», ЗАО «Оливья», 2007. Регистрационный № 25240-07.

8. Кангин В. В., Козлов В. Н. Аппаратные и программные средства систем управления.

СЕКЦИЯ 4

Информационные системы и технологии

Председатели секции:

д-р техн. наук А. Н. Гетманец канд. техн. наук Н. Н. Вовк В. Н. Старовойтов

МАРШРУТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ СХЕМ

<u>Д. Е. Боркивец</u>, А. И. Егоров, А. Г. Кузякин

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

Введение

Современные электронные устройства можно подразделить на три больших класса: аналоговые, импульсные и цифровые. К аналоговым устройствам относятся функциональные электронные узлы, предназначенные для выполнения операций над аналоговыми сигналами. Под аналоговыми сигналами понимаются сигналы, существующие во всем рассматриваемом интервале времени, и, имеющие производную по времени во всех точках этого интервала. За исключением, может быть, их конечного числа.

К импульсным устройствам относятся функциональные узлы, предназначенные для создания импульсных сигналов требуемой формы и выполнения над ними различных операций и преобразований (интегрирования, дифференцирования, задержки во времени и т. п.). Импульсными сигналами принято называть электрические колебания, существующие в пределах конечного отрезка времени. При этом импульсные сигналы подразделяют на радиоимпульсы, имеющие высокочастотное синусоидальное заполнение, и видеоимпульсы, не имеющие такового.

У импульсных и аналоговых устройств имеется много общего в части структурных и функциональных схем. Так как носителем информации и объектом обработки является временная зависимость напряжения или тока, то основная задача, которую решают как аналоговые, так и импульсные устройства, состоит в преобразовании одной функции времени в другую.

К цифровым устройствам (ЦУ) относятся функциональные узлы, предназначенные для выполнения различных операций над цифровыми сигналами. С точки зрения обработки информации цифровое устройство выполняет преобразование кодового слова одной размерности в кодовое слово другой или такой же размерности. Таким образом, главное отличие цифровых устройств от аналоговых и импульсных устройств состоит в том, что носителями информации являются двоичные или кодовые слова, а не функции времени.

В настоящее время электроника достигла высочайшего уровня, как по быстродействию, так и по функциональным возможностям. Современная жизнь немыслима без мощных, высокопроизводительных систем. Основной тенденцией в развитии радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники является повышение скорости обработки информации. Усложнение структуры устройств и сокращение сроков проектирования приводят к увеличению роли занимаемой средствами моделирования в общем цикле разработки устройства. Моделирование позволяет обоснованно выбирать схемотехнические и конструкторские решения, способствующие обеспечению целостности сигналов и питания.

Цели и задачи

Целью данной работы является проверка маршрута функционального моделирования аналоговых схем из состава модернизируемых и вновь разрабатываемых приборов автоматики. В качестве тестовой схемы выбрана схема блока питания вторичного.

Маршрут

Исходными данными для проведения моделирования являются: принципиальная электрическая схема (Altium Designer, рисунок), перечень элементов (текст, таблица), условия моделирования (текст). Основные этапы маршрута представлены на рис. 1.



Рис. 1. Этапы маршрута функционального моделирования

Подготовительные этапы

Данные этапы нацелены на подготовку исходных данных для программы моделирования и включают в себя: корректировку схемы, определение библиотеки моделей, создание тестового окружения.

Корректировка схемы

Исходными данными для корректировки является схема, представленная в формате Altium Designer. В связи с особенностями экспорта программы требуется выполнить следующие действия в редакторе схем (Altium Designer):

 заменить многосоставные элементы односоставными аналогами;

исключить кириллические символы из обозначений;

 добавить порты ввода/вывода стандартными средствами программы.

Полученная схема из Altium Designer экспортируется в список связей формата Verilog. Пример схемы БПВ адаптированный для экспорта из Altium Designer в список связей представлен на рис. 2.

Для работы программы моделирования, полученные данные, корректируются следующим образом:

– преобразование списка связей в формат Verilog-AMS;

- объявление списка параметров;

 коррекция области описания моделей в структурной схеме.

Представленные операции корректирования являются однотипными и могут быть автоматизированы программными средствами. В результате формируется список связей Verilog-AMS пригодный для программы моделирования.

Определение библиотеки моделей

Исходными данными является перечень элементов схемы и базовый набор моделей элементов. Перечень содержит в себе информацию о позиционном обозначении и наименовании элемента (пример перечня элементов БПВ представлен в табл. 1). Базовая модель выполнена на языке Verilog-AMS или Spice и конфигурируется списком параметров. На основании перечня элементов производится выборка базовых моделей из общего набора, в случае отсутствия модели следует произвести разработку на языке Verilog-AMS или использовать spice модель. К примеру, в связи с отсутствием моделей, были разработаны на Verilog-AMS модели диода, диодной сборки, МДП-транзистора. Для трансформатора использовалось spice описание.

Перечень элементов

Позиционное обозначение	Наименование элемента		
R6,R11,R19,R20	Р1-12-2,0-1кОм		
R7,R8,R15,R17	С2-33Н-2,0-20Ом		
R9,R16	Р1-12-0,5-301Ом		
R10,R14	Р1-12-0,25-10Ом		
C12,C18,C32	К10-17в-Н90-1,5мкФ		
C6,C9,C11,C15,C16,C19, C30,C31,C33,C34,C35	К53-68'Е'-50В-15мкФ		
C17,C22,C29,C36	К10-47Мв-250В-1500пФ		
VD2,VD4,VD5,VD6	2Д237Г1/ПМ ¹		
D1	2Д273BC2 ¹		
VT1,VT2	2П7169A ¹		
L1,L2	АС319.070-01 600мкГн		
L3	АС319.070-01 200мкГн		
Т3	АИБ3_2x10-2x8 ¹		
T4	ТИЛЗВ АГ0.472.105ТУ ¹		
^{1 Примечание} Отсутствует модель элемента			

Создание тестового окружения

Исходными данными являются схема включения и условия моделирования.

Условия моделирования могут включать в себя:

 – информацию о требованиях к параметрам входных и выходных сигналов;

- температуру окружения;

- напряжения питания;
- сопротивление нагрузки;

– разбросы номинальных значений элементов схемы.

Представленный перечень является примером, точный список проверяемых условий определяет разработчик схемы.

Для проведения исследования разработана модель тестового окружения, включающего в себя импульсные источники питания, блок питания вторичный и нагрузку на выходах блока питания. Общая схема тестового окружения приведена на рис. 3.

Моделирование тестового окружения должно проводится при нагрузке:

а) сопротивление нагрузки канала 1 и 2 – 100 Ом;

б) сопротивление нагрузки канала 3 – 30 Ом.



Рис. 2. Схема, адаптированная для экспорта



Рис. 3. Схема тестового окружения БПВ

Моделирование требуется провести с параметрами входного напряжения и параметрами импульсных источников, приведенных в табл. 2.

На основании условий моделирования и перечня элементов требуется создать две таблицы параметров. В первую вносится информация о параметрах моделей элементов списка связей (табл. 3). В верхней строке указаны названия параметров, столбец id обозначает номер теста, т. к. требования к элементам отсутствуют, то имеется только одна строка значений, соответствующая номинальным.

Во вторую таблицу параметров вносится информация моделирования тестового окружения (табл. 4).

Таблица 2

Требуемые параметры моделирования

Входное напряже- ние, В	Период формирования импульсов источниками пи- тания, мкс	Длительность импульса источника питания, мкс	Скважность импульсного источника питания, %
30	10	2.2	22
20	10	2.2	22
20	10	2.5	25

Таблица 3

Параметры моделей БПВ

id	R_R6	R_R11	R_R9	R_R10	C_C30	C_C33	C_C17	C_C12	
1	1e3	1e3	301	10	15e-6	15e-6	150e-11	1.5e-6	

Таблица 4

Параметры тестового окружения БПВ

id	V_in	Period	Pulse_Width
1	30	10e-6	2.2e-6
2	20	10e-6	2.2e-6
3	20	10e-6	2.5e-6

В верхней строке указаны названия параметров, столбец id обозначает номер теста. В соответствии с требованиями в табл. 2 записаны три варианта набора параметров.

Из полученных таблиц в автоматическом режиме происходит генерация файлов параметров моделей и тестов. Пример файлов параметров приведен в листинге 1-4.

Листинг 1. Файл параметров моделей БПВ

parameter real R_R6=1e3; parameter real R_R11=1e3; parameter real R_R9=301; parameter real R_R10=10; parameter real C_C30=15e-6; parameter real C_C17=150e-11; parameter real C_C12=1.5e-6;

• • •

Листинг 2. Файл параметров теста 1 БПВ

parameter real V_in=30; parameter real Period=10e-6; parameter real Pulse Wigth=2.2e-6;

Листинг 3. Файл параметров теста 2 БПВ

parameter real V_in=20; parameter real Period=10e-6; parameter real Pulse_Wigth=2.2e-6;

Листинг 4. Файл параметров теста 3 БПВ

parameter real V_in=20; parameter real Period=10e-6; parameter real Pulse Wigth=2.5e-6;

Моделирование

Моделирование всех необходимых вариантов реализовано в автоматическом режиме. Количество вариантов тестирования характеризуется количеством файлов параметров. Схематичное представление автоматизации моделирования на рис. 4.



Рис. 4. Автоматизация моделирования



Рис. 5. Общая форма входных сигналов БПВ



Рис. 6. Графическое представление результатов моделирования БПВ теста 1



Рис. 7. Графическое представление результатов моделирования БПВ теста 2

114 0.0 sfstep	0.00000	0.00000	(0.00060)	У(start, vip, mist vip. 18, ОМРА(5109) Импульсный источник питания от 0 до 10В
113 113 113 114 115 115 115 115 115 115 115 115 115	10.00000	TO 00000	10 000001	V(start, мр., mini мр. 10, 10МINL50V) Импульсный источник питания от 10 до 0В
142 2845 2845 2845 2845 2845 2845 2845 28	<u>12.00000</u>	<u>20.00000</u>	[20.00000]	<u>V(start,vip,misi.vip.10,309)</u> Питание схемы
0.5	522.00124)	FILING	-31.27932	<u>устал, чо, тык чо опта мяльзоу</u> Первый отрицательный выход схемы
Wollage (W)	(13 88110)	X[<u>51.01047]</u>	[11.27932]/	У(зtart, мр., mini мр. 0071, PU5309) Первый положительный выход схемы
	([0.34613]	N21.22894	[<u>]1.66103</u>]/	
- <u>48</u> 0.8M 2.5M 4.6M	6.1m <u>C3: 6.54464M (dx = -7.91071M)</u>	10.000 12.00 (27.9.8339504.00/-1-4.0214304)	21 14 455564	

Рис. 8. Графическое представление результатов моделирования БПВ теста 3

При запуске программных средств происходит запись файлов параметров, после чего стартует моделирующая программа. По завершению работы производится автоматическая перезапись файлов параметров с другими данными, после чего программа моделирования запускается вновь. Этот цикл продолжается до тех пор, пока не будут промоделирована структурная схема и тестовое окружение со всеми файлами параметров предоставленных программе.

Обработка

Обработка происходит в автоматическом режиме. Она включает в себя централизованный сбор результатов после каждой итерации моделирования и преобразование в текстовый формат.

Сбор результатов позволяет в любое время просмотреть интересующие графики поведения схемы любых условий моделирования сторонними программами. Например, общая форма входных сигналов схемы БПВ представлена на рис. 5. Графическое представление результатов моделирования БПВ на рис. 6,7,8.

Преобразование данных в текстовый формат позволяет работать с результатами на программных средствах, не совместимых с форматом программы моделирования.

Предполагаемое выходное напряжение схемы равняется 30 В. Результаты моделирования представлены в табл. 5.

Из таблицы видно, что при уменьшении входного напряжения до 20 В без изменения скважности выходной сигнал уменьшается, а при увеличении скважности с напряжением 20В выходной сигнал выходит на уровень, примерно равный первому тесту.

Исследование схемы БПВ подтверждают зависимость выходного напряжения от скважности и амплитуды входных сигналов.

Таблица 5

Результаты	модели	рования	БПВ
------------	--------	---------	-----

		Примерное выходное			
Byonuoe	Скважность	Н	апряжение		
изпраже-	импульсных	Выход 1	Выход 1		
напряже-	источников	Отрица-	Положи-	Выход 2,	
IIIC, D	питания, %	тельный,	тельный,	В	
		В	В		
30	22	-29.65	29.65	30.74	
20	22	-27.85	27.85	28.23	
20	25	-31.27	31.27	31.66	

Заключение

Подтверждена работоспособность маршрута с наиболее распространённым программным обеспечением, с наиболее распространёнными языками описания аппаратуры. Имеется возможность повышения автоматизации маршрута. По результатам проделанной работы принято решение включить данный маршрут в разработки подразделения. Ожидается, что это приведёт к повышению эффективности работы в следующих проектах.

ОБЗОР ПРОБЛЕМ ПЕРЕХОДА НА ПРОЦЕССНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СФЕРЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

В. Л. Ведерников, В. В. Дунькович, Н. В. Горбатенко, С. С. Горелова, О. В. Кривошеев

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

Одной из актуальных задач на сегодняшний день для любого предприятия является повышение конкурентоспособности при минимизации затрат. Это значит, что при снижении себестоимости необходимо инвестировать в развитие и совершенствование технологии рабочих процессов, повышать качество продукции, соответствовать требованиям государственных и международных стандартов. Решением вышеназванных задач стал переход к процессному управлению деятельностью предприятия.

Деятельность любого предприятия можно представить как систему взаимосвязанных процессов. Процесс – это повторяющаяся совокупность упорядоченных и взаимосвязанных действий, создающая результат, значимый для конечного или внутреннего потребителя. Процессное управление – деятельность по формированию целенаправленного поведения организации посредством выделения, описания и менеджмента системы взаимосвязанных и взаимодополняющих процессов организации и их ресурсного окружения.

Процессный подход в управлении предприятием позволяет:

– устранить коммуникационные, информационные и другие барьеры

- быстро реагировать на изменения;
- видеть работникам конечный результат;
- ориентироваться на клиента, потребителя;
- устранить дублирующие функции;
- повысить слаженность работы предприятия;
- выстроить сквозные процессы;

 – выстроить оргструктуру, ориентированную на эффективное выполнение процессов [1].

Научно-производственное предприятие, выпускающее наукоёмкую продукцию, обладает огромным количеством компетенций в различных направлениях деятельности: научно-исследовательских, опытноконструкторских, производственных, управленческих и других. Разноплановая продуктовая линейка, сложные процессы создания изделий и предоставления услуг, большое количество участников и сложные взаимосвязи между ними требуют классификации, систематизации и наглядного представления [2].

Принципы процессного управления можно применить и для описания наукоемкой, основной (то есть определяющей профиль предприятия и имеющие стратегическое значение) деятельности научнопроизводственного предприятия со всеми преимуществами процессного подхода. Процессный подход рассматривает научнопроизводственную деятельность предприятия, включая проведение опытно-конструкторских и научноисследовательских работ, конструкторское и схемотехническое проектирование изделий, как последовательную смену состояний в развитии продукта; непрерывное выполнение повторяющейся совокупности определенных упорядоченных и взаимосвязанных действий, создающей результат, значимый для конечного или внутреннего потребителя [3].

В рамках проекта по описанию, совершенствованию бизнес-процессов деятельности научно-производственного предприятия необходимо обеспечить эффективное управление длительностью, качеством и стоимостью бизнес-процессов. Только усовершенствованные и отлаженные бизнес-процессы могут служить основанием для проведения автоматизации.

Преимущества внедрения процессного подхода в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность:

 – выстраивание непрерывного взаимосвязанного проведения научных и производственных работ;

 внесение ясности и прозрачности в процессы научной, исследовательской и экспериментальной деятельности; получение синергетического анализа результатов;

 – автоматизированная регламентация научных работ в виде графических схем алгоритмов; сохранение и передача «критических» знаний, возможность наставничества и обучения сотрудников;

 постоянное улучшение процессов исследований и научно-производственной деятельности, основанных на комплексных результатах [3].

Несмотря на то, что применение процессного управления ведет к улучшению качества продукции и услуг предприятия, устранению «узких мест» бизнес-процессов, внедрение процессного подхода сопряжено с определенными рисками, связанными с неизбежным изменением внутренней ситуации предприятия, сложившихся навыков работы, образа мышления сотрудников и руководства [4].

Существует следующий ряд проблем общего характера, возникающих при внедрении процессного подхода независимо от сферы деятельности предприятия.

1. Отсутствие целостной системы определений, понятийного аппарата в области процессного управления, теоретической базы, в полной мере раскрывающей сущность и реальные возможности процессного подхода. 2. Отсутствие методических разработок перехода к процессно-ориентированному управлению, отсутствие стандартов на описание и регламентацию бизнес-процессов, методик применения инструментов моделирования бизнес-процессов.

3. Отсутствие команды управленцев верхнего уровня, заинтересованных в переходе к процессному управлению; некорректная постановка целей и задач проекта перехода к процессному управлению.

4. Изначальная неупорядоченность деятельности предприятия, размытые зоны ответственности, недокументированность деятельности.

5. Недостаточный уровень компетентности в области процессного подхода рабочей группы проекта внедрения; неэффективное применение инструментов моделирования бизнес-процессов; недостаточный уровень владения инструментами моделирования и совершенствования бизнес-процессов; недостаточное выделение ресурсов для внедрения.

6. Столкновение интересов участников процессов. Данная проблема связана с прозрачностью процессного управления. Процессное управление нельзя осуществить без достоверного документирования процессов и деятельности в целом, включая стратегическое определение целей.

7. Попытка охватить все процессы сразу. При внедрении процессного управления предприятие пытается начать описывать все существующие в организации процессы. Однако при этом организация зачастую сталкивается с нехваткой ресурсов и сложностью управления таким масштабным проектом.

8. Сопротивление со стороны персонала. Практика внедрения процессного подхода на российских предприятиях показывает, что при этом руководство сталкивается с такой серьезной проблемой как сопротивление изменениям со стороны персонала. Любые действия, связанные с реализацией процессноориентированного управления, рассматриваются сотрудниками как «дополнительные», добавленные к основной деятельности [5].

Вышеперечисленные проблемы можно решить планомерной и грамотной подготовкой к внедрению процессного подхода и процессного управления на предприятии, как было сделано в ходе пилотного проекта по глобальному внедрению процессного управления в научно-производственные, обеспечивающие и управленческие процессы РФЯЦ-ВНИИЭФ, проводимого в 2011–2015 гг. в рамках разработки и внедрения Типовой информационной системы (ТИС) предприятий ЯОК.

Старт работ по внедрению процессного подхода в РФЯЦ-ВНИИЭФ дан вводом в действие приказа Госкорпорации «Росатом» «О мерах по внедрению процессной модели отрасли». Цель внедрения процессного управления определилась из цели ГК «Росатом» – повышение эффективности системы управления Госкорпорации и ее организаций, и определение единых подходов, задач, принципов процессного управления. Для предотвращения и устранения проблем внедрения процессного подхода была проведена масштабная подготовка: выпущен ряд организационнораспорядительных документов; сформированы и обучены организационные структуры, рабочие группы из сотрудников предприятия для проведения работ по внедрению процессного подхода и описания бизнеспроцессов; разработан ряд методических и нормативно-справочных документов в данной области, выпущен стандарт предприятия по описанию бизнеспроцессов; приглашены внешние консультанты [3].

Результат работ – сформирована и внедрена Комплексная процессная модель РФЯЦ-ВНИИЭФ «как должно быть», представляющая собой взаимосвязанную совокупность всех видов разработанных процессных моделей подразделений предприятия – моделей бизнес-процессов, моделей организационной структуры, моделей «Дерева целей», моделей «Базовых и критических технологий», каталогов информационных систем и др. [1].

Однако непосредственно в ходе внедрения процессного подхода в научно-производственную деятельность предприятия, в частности, в наукоемкие процессы создания и разработки электронных систем радиоэлектронной аппаратуры, возник ряд специфических проблем, обусловленных сложностью научных, исследовательских, производственных процессов в данной области.

Рассмотрим эти проблемы.

1. Наличие большого объема «недокументированных» знаний в сфере создания сложных электронных систем радиоэлектронной аппаратуры.

«Недокументированные» знания, умения, компетенции – это наиболее ценные знания, умения, компетенции экспертов в области наукоемких технологий, полученные не в ходе обучения, а в ходе длительного накопления коллективного профессионального опыта, проведения научной, интеллектуальной деятельности, изобретений в течение длительного времени [7, 8, 9, 10].

Такие компетенции плохо поддаются формализации. Для формирования компетенций в области создания сложных электронных систем радиоэлектронной аппаратуры недостаточно просто привести информацию из Квалификационного справочника и должностных инструкций. Необходимо провести серьезную работу по исследованию научных трудов, изобретений в данной области, провести многочисленные консультации с экспертами. И даже в этом случае формализовать и зафиксировать полный набор знаний, компетенций и умений, достаточный для разработки сложных электронных систем на высшем профессиональном уровне не представляется возможным [11].

2. Отсутствие в моделях бизнес-процессов специфики реальных процессов.

Объемность и разноплановость научнопроизводственного процесса разработки сложных электронных систем РЭА – причина того, что при попытке сформировать бизнес-процессы в данной области происходит неизбежная формализация описания. В итоге модель бизнес-процесса получается выхолощенной, не содержащей специфику реальных процессов, а, значит – бесполезной.

3. Нечитаемость моделей бизнес-процессов.

При попытке детально описать процессы создания сложных электронных систем радиоэлектронной аппаратуры с учетом специфики процессов получаются слишком объемные и нечитаемые схемы моделей. Причина– сложность процессов и разная степень понимания уровней детализации моделей рабочей группой и внешними консультантами по внедрению процессного подхода.

4. Отсутствие компетенций у консалтинговых фирм-консультантов в области внедрения процессного подхода в сложную и разноплановую научноисследовательскую, экспериментальную и производственную деятельность предприятия.

При отсутствии опыта и готовых решений у приглашаемых «внешних» консультантов для описания бизнес-процессов научно-производственной деятельности приходится привлекать в качестве групп внедрения процессного подхода непосредственно специалистов данного предприятия. Причем для качественного описания сложной научной и производственной деятельности уровень экспертов должен быть на уровне владельцев процессов - руководителей высшего и среднего звена. В итоге получается, что, параллельно со своими сложными непосредственными должностными обязанностями, руководители высшего и среднего звена, экспертыпрофессионалы своего дела, научные деятели должны дополнительно уделять свое рабочее (а часто и внерабочее) время для формирования моделей бизнес-процессов предприятия в зоне своей ответственности. Такая ситуация приводит к неоправданным трудозатратам, переработке высокопрофессиональных сотрудников и увеличению объема работ, не связанных с их непосредственными задачами. Вследствие этого могут возникнуть риски снижения качества и увеличения сроков выполняемых предприятием работ в основной сфере деятельности [3].

5. Наличие других систем повышения качества продукции, в которых также используются модели процессов предприятия.

Для повышения эффективности деятельности предприятие может применять различные методы и технологии, например, внедрение системы менеджмента качества (СМК) изделий; построение типовых сетевых моделей (ТСМ) для планирования и управления в рамках ERP-системы (Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия); внедрение PDM-системы (Product Data Management, управление данными об изделии) и т. п. Данные системы принадлежат к разным классам и узкоспециализированы, они не взаимодействуют между собой, однако в них также так или иначе используются модели производственных процессов предприятия. Таким образом, для успешного внедрения процессного подхода процессную модель предприятия необходимо формировать не «с чистого листа», а с учетом существующих на предприятии систем повышения качества изделий [3].

Перечень проблем может быть продолжен. Каждое научно-производственное предприятие, внедряющее процессный подход в наукоемкую деятельность по созданию сложных технических систем, может столкнуться со своим индивидуальным набором проблем.

Однако, необходимость совершенствования своей деятельности и систем управления в соответствии с современными тенденциями и требование повышения качества продуктов и услуг до мирового уровня должны мотивировать предприятие на преодоление возникающих трудностей и продолжение развития в данном направлении, так как другого, более подходящего, современного метода повышения эффективности управления как научно-производственной, так и экономической деятельностью, чем процессное управление, мировое сообщество еще не придумало [11].

В данной работе проведен анализ сложившейся ситуации в области внедрения процессного управления в научно-производственную деятельность, приведен ряд общих проблем внедрения процессного подхода и пример их решения на научно-производственном предприятии (РФЯЦ-ВНИИЭФ), выявлен и описан ряд специфических проблем внедрения процессного подхода в наукоемкую деятельность.

Практическая ценность данного исследования – обобщенный обзор проблем внедрения процессного подхода в научно-производственную деятельность по созданию сложных электронных систем для дальнейшей разработки комплекса мероприятий по предупреждению и устранению данных проблем, что повысит эффективность внедрения процессного управления и моделирования бизнес-процессов научно-производственной деятельности предприятия, в том числе и в сфере наукоемких технологий.

Литература

1. Свидетельство РФ № 2013621192 о государственной регистрации базы данных. Процессная модель РФЯЦ-ВНИИЭФ 2012 года «Как должно быть». Костюков В. Е., Комаров Г. В., Свеженцев Г. В., Карташов Г. А., Соловьев В. П., Кривошеев О. В., Карпенко С. В. // 2013.

2. Свидетельство РФ № 2014620165 о государственной регистрации базы данных. Методика внедрения процессного подхода на предприятиях ЯОК. Кривошеев О. В., Карпенко С. В., Коновалова В. В., Голеусова С. О., Затонская И. А. // 2014.

3. Ведерников В. Л., Горбатенко Н. В., Запонов Э. В., Кривошеев О. В., Николаев Д. Б. Проблемы внедрения процессного подхода в процессы разработки электронных систем радиоэлектронной аппаратуры: сборник трудов XXXVII Всероссийской научнотехнической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем».– Серпухов. – 2018.

4. Борисенков И. А., Дороненков М. Н., Николаев Д. Б., Мартынов А. П., Фомченко В. Н. Концепция информационного взаимодействия участников процесса разработки наукоемкой продукции: сборник материалов Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ-2014».– 2014. – С. 176–178.

5. Собакарева А. В. Процессный подход и мероприятия по устранению проблем его внедрения на российских предприятиях. СПб: СПбГУ, 2008.

6. Запонов Э. В., Костюков В. Е., Кривошеев О. В., Мартынов А. П. Комплексная разработка и внедрение интегрированных информационных систем на современном предприятии: сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем».– Серпухов. – 2017. – № 5. – С. 96–101.

7. Мартынов А. П., Мартынова И. А., Николаев Д. Б. Криптографические системы и метод факториального сжатия. Научно-технический журнал. Известия института инженерной физики. № 4 (42) 2016, стр.54–57.

8. Орлов А. В., Николаев Д. Б., Точилин А. В., Чащихин С. С. Исследование вопросов суперпозици-

онной идентификации при анализе конфигурации системы: МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. Сборник материалов X Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров. – 2016. – С. 21–22.

9. Бабанов Н. Ю., Мартынов А. П., Николаев Д. Б., Фомченко В. Н., Новиков А. В. Виртуальная интерактивная система формирования и отработки управляющей информации: Вестник НГИЭИ. – 2016. – №4 (59). – С. 15–29.

10. Запонов Э. В., Мартынова И. А., Миронов В. Е., Николаева И. А., Фомченко В. Н. Интеллектуальная защита как базовая составляющая научных исследований. Учебное пособие. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017.–136 с.:ил.

11. Запонов Э. В., Костюков В. Е., Кривошеев О. В., Мартынов А. П. Комплексная разработка и внедрение интегрированных информационных систем на современном предприятии: сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем».– Серпухов. – 2017. – № 5. – С. 96–101.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

<u>Д. С. Дороднев</u>, О. А. Кузнецова

ФГУП «ПСЗ», г. Трехгорный Челябинской обл.

Контроль исполнения документов является необходимым условием функционирования предприятия, а также важным направлением разработки автоматизированных информационных систем на ФГУП «ПСЗ». И хотя система электронного документооборота (СЭД), позволяющая отслеживать исполнение документов, функционирует на предприятии уже в течение 13 лет, стало очевидным, что на предприятии отсутствуют инструменты качественного и своевременного контроля исполнения документов. Более того, возникла необходимость для контроля исполнения не только документов, но также и поручений, мероприятий, результатов совещаний и т. д. Другими словами, возникла необходимость в системе, оперирующей на более высоком уровне абстракции, чем понятие о документах, но также позволяющая контролировать выполнение распоряжений в каком-либо виде. Это явилось предпосылкой для разработки автоматизированной системы управления исполнительской деятельностью (АСУИД), решающей целый ряд проблем, таких как:

 недостаточно эффективный механизм контроля исполнения распорядительных документов Госкорпорации «Росатом», входящих внешних документов, организационно-распорядительных документов предприятия (приказов, распоряжений, протоколов совещаний, планов мероприятий) и соблюдение сроков их исполнения;

отсутствие функции мониторинга в реальном режиме времени состояния текущих работ по документам, подлежащим контролю;

 потери времени руководства предприятия, связанные с выдачей поручений и отслеживанием их исполнения;

 затраты времени исполнителей (заместителей генерального директора, руководителей подразделений) на отчетность по документам, подлежащим контролю.

Следствием всего вышеперечисленного является неисполнение или ненадлежащее исполнения документов, низкая исполнительская дисциплина, что в конечном итоге приводит к репутационным и финансовым рискам предприятия.

Проектирование и разработку системы начали в рамках реализации ПСР-проекта «Реинжиниринг системы контроля исполнительской деятельности предприятия», основными целями которого являлось устранение выше обозначенных проблем. На начальном этапе проектирования было принято решение о разработке АСУИД как аналитической системы верхнего уровня, использующей информацию из СЭД, с дальнейшим развитием как системы, не имеющей ограничений по видам документов и видам деятельности, на вход которой могут подаваться в автоматическом режиме любые информационные потоки.

В ходе анализа предметной области, на этапе построения первичной модели были выделены принципы и ограничения разрабатываемой системы:

 все документы, требующие контроля исполнения, ставятся на контроль в СЭД;

 в документе должен быть указан срок исполнения (или стоять отметка контроля), должны быть указаны ответственные исполнители и контролирующие;

 на контроль ставятся конкретные пункты документа, имеющие срок – следовательно, исполнителям и контролирующим в СЭД по одному документу могут приходить несколько заданий;

 отчеты исполнителей по выполнению документов – только в СЭД;

прием отчетов контролерами – только в СЭД;

 отчеты принимаются только по типу – принят/не принят (результат либо есть, либо его нет);

 вводится система напоминания в СЭД (сотрудник будет получать в СЭД уведомление о том, что просрочил или вот-вот просрочит какую-то задачу);

 любой перенос сроков и аннулирование работ по внутренним документам – только по отдельному распорядительному документу;

 бумажный внешний документ по исполнителям рассылаться не будет – только в СЭД.

Затем были определены и формализованы основные информационные объекты системы (приказы вышестоящих органов, письма ГК «Росатом», входящая корреспонденция, внутренние приказы предприятия, утверждаемые генеральным директором, заместителями генерального директора, протоколы общезаводских совещаний, заседаний, а также все документы, в исполнении которых задействовано несколько подразделений предприятия), которые в дальнейшем были отображены на программную модель.

Дальнейшая разработка АСУИД велась параллельно: в СЭД разрабатывался модуль документооборота по выбранным информационным объектам и одновременно разрабатывался прототип аналитической системы, интегрированный с СЭД. Технология разработки модулей для СЭД на ФГУП «ПСЗ» является освоенной и не является темой доклада.

Разработка аналитического модуля началась с выбора базовых абстракций для моделирования. В первую очередь была выделена концепция мероприятия – обобщенный вид документов, планов, графиков, протоколов совещаний и т. д., затем выделены сотрудники, как иерархически организованные пользователи системы, и связи между сотрудниками и мероприятиями. Сразу были заложены основы для дальнейшего расширения системы: различные стратегии учета мероприятий, подсчета характеристик сотрудников.

Характеристики мероприятий находятся в зависимости от типа представляемого информационного объекта, графа сотрудников, которые связанны с данным мероприятием, стратегиями расчета ключевых характеристик, а также в зависимости от других мероприятий. Также в систему изначально закладывался механизм переадресации выполнения мероприятий, с сохранением ответственности за выполненное мероприятие перед контролером. Вне зависимости от типа информационного объекта, мероприятие всегда обладало характеристиками, следующими из ограничений системы: планируемой датой выполнения, фактической датой выполнения, ответственным исполнителем и контролирующим. Данные характеристики напрямую влияют на визуализацию графа сотрудников с целью максимально быстрого определения состояния выполнения документов.

После моделирования мероприятий начался процесс изучение методов взаимодействия пользователей с АСУИД. Для начала были определены основные категории пользователей: руководители, исполнители, ответственные за выполнение мероприятий отдела, ответственные за направление, замещающие сотрудники и т. д.

С категорией пользователя связали механизмы поиска подчиненных сотрудников, мероприятий, расчет коэффициентов и визуализации сотрудников. Отдельно прорабатывалась возможность замещения сотрудников только по конкретной части мероприятий.

Для оценки уровня исполнительской дисциплины был введен коэффициент исполнительской дисциплины (КИД). Данный показатель рассчитывается для сотрудника в качестве исполнителя, руководителя, контролирующего или их сочетаний за отчетный период следующим образом:

 КИД исполнителя рассчитывается как отношение выполненных мероприятий, в которых данный сотрудник является ответственным исполнителем, к сумме просроченных и выполненных с отставанием;

 КИД руководителя рассчитывается аналогично КИД исполнителя, но с учетом мероприятий подчиненных;

– КИД контролирующего рассчитывается как отношение выполненных мероприятий, в которых

данный сотрудник является контролирующим, к сумме просроченных и выполненных с отставанием;

При проектировании АСУИД было принято решение выбрать в качестве отчетного периода месяц, затем в процессе опытно-промышленной эксплуатации добавились квартал, год и произвольный интервал времени.

Автоматический расчет и визуализация КИД позволяет быстро оценить состояние дел у сотрудника или подразделения. Генеральным директором предприятия принято решение часть материального поощрения у заместителей генерального директора и руководителей подразделений за выполнение работы поставить в зависимость от КИД. С увеличением количества подчиненных в расчете КИД пользователя увеличивается значимость коэффициента КИД руководителя, и соответственно усиливается контроль исполнения мероприятий своими подчиненными, увеличивается количество выполненных в срок мероприятий, что является одной из основных целей разработки АСУИД.

После проработки основных концепций и выбора аналитической системы была начата разработка прототипа.

Разработка прототипа начата с выбора наиболее подходящей архитектуры программного обеспечения (ПО) и программно-аппаратной платформы. Наиболее подходящими архитектурами были многозвенная архитектура (трехзвенная) с «тонким клиентом» (браузером) у пользователя и двухзвенная клиентсерверная архитектура с «толстым клиентом». Сравнив достоинства и недостатки данных архитектур применимо к разработке АСУИД, для реализации системы была выбрана клиент-серверная архитектура. Главным аргументами при выборе данной архитектуры стали массивные вычисления при визуализации графа мероприятий и сотрудников, а также возможность построения более отзывчивого и богатого интерфейса пользователя с сокращением сроков разработки ПО.

После выбора архитектуры необходимо было выбрать программные каркасы для увеличения скорости разработки ПО.

Наиболее удобной программной технологией ускоренной разработки клиент-серверного ПО на текущий момент является платформа .Net с каркасом уровня представления WPF.

Для хранения данных системы была использована СУБД Oracle, как наиболее распространённая на ФГУП «ПСЗ». Для результативной работы с БД и уменьшения количества шаблонного кода, а также упаковкой данных, полученных из БД, в структуры, было принято решение использовать библиотеки для объектно-реляционного отображения. Из-за оптимальной программной модели АСУИД, а также для увеличения контроля над генерируемыми SQL запросами была выбрана легковесная библиотека Dapper.

В качестве основного язык программирования был выбран С#, из-за развитой экосистемы, гибкого

синтаксиса, сочетающего объектно-ориентированный и функциональный подход, а также развитых инструментов быстрой разработки и множества разработанных компонентов отображения данных.

При проектировании архитектуры было принято решение использовать принцип слоеной архитектуры для обеспечения функциональной модульности, а также обеспечения слабой связности. Было выделено четыре основных слоя: отображения, модели, служб, доступа к данным и инфраструктуры (см. таблицу)

Наименование	Функции	Используемые библиотеки и каркасы
Слой отображения	Визуализация пользова- тельского интерфейса, организация взаимодей- ствия с пользователем	WPF
Слой служб	Организация взаимо- действие между слоями моделей, данных, отображения	
Слой модели	Программная модель предметной области, бизнес-функции, регламенты и ограничения	
Слой данных	Функции для коммуни- кации с базой данных и получением данных	Dapper
Инфраструк- турный слой	Вспомогательные моду- ли для реализации алгоритмов сортировок, поиска, визуализации полключений и т. л.	

Информация о функциональных слоях

Для уменьшения связности между слоями отображении, служб, данных использовался метод инверсии зависимостей с определением интерфейсов взаимодействия между программными модулями. В слое модели для уменьшения связности использовались фабрики структур данных.

Для увеличения надежности в слоях модели использовались практики защищенного программирования. Система типов разрабатывалась таким образом, чтобы исключить использование неопределенных объектов. Для этого активно использовались опциональные типы. Методы объектов, при возможности, определялись как чистые функции, то есть как функции, не вносящие изменения в поля объекта.

Доступ к данным был организован при помощи библиотеки Dapper. Главной особенностью, повлиявшей на выбор данной библиотеки, стало отсутствие необходимости добавлять в проект определённым образом сконфигурированную инфраструктуру, писать файлы отображения реляционных структур данных на программные объекты или изучать специфичный язык запросов. Dapper почти не требует конфигурации, основная работа производится через методы расширения к стандартному модулю IDbConnection. После написания и выполнения SQL запроса можно сразу получить результат в виде массива с данными необходимого типа. Данная библиотека не позволяет получить граф связанных объектов, как альтернативные решения по объектнореляционному отображению, но обладает высокой производительностью.

По окончанию разработки предстоял этап ввода АСУИД в эксплуатацию. Было принято решение выбрать подмножество типов документов, на которых провести опытно-промышленную эксплуатацию системы в течение 5 месяцев, а именно приказы по предприятию, входящие письма и документы ГК «Росатом». По определению КИД является понижающим коэффициентом, соответственно особого энтузиазма внедрение АСУИД у руководителей не вызвала. Но в дальнейшем руководители оценили АСУИД, так как системный подход оценки результативности исполнения поручений и документов снижал предвзятость в оценке персонала и являлся неким объективным показателем дисциплины сотрудника. Визуализация позволяла мгновенно оценить проблемные документы и направления, и сосредоточится на приоритетных для предприятия документах.

Таким образом, анализ данных контроля исполнения документов необходим не только руководителю для усиления исполнительской дисциплины, но и для усовершенствования всей структуры управления. Применение автоматизированной системы контроля исполнения позволило снизить эффект человеческого фактора. Такие ответы как «забыл», «не видел», «упустил» стали звучать значительно реже. Использование КИД в системе контроля исполнения совместно с применением системы мотивации позволило значительно повысить исполнительскую дисциплину. В итоге выиграли все: и руководители, и сотрудники.

МОДУЛЬ ТРАНСПОРТНОГО УРОВНЯ ЛОГОС МИП ДЛЯ РАСЧЕТА СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ

<u>А. В. Дьяков,</u> А. Г. Надуев, А. Д. Черевань, Д. А. Кожаев

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

Введение

Модульная интеграционная платформа (МИП), входящая в состав пакета программ ЛОГОС [1], используется для ряда задач, в числе которых подготовка и проведение связанных расчетов комплексных мультидисциплинарных задач математического моделирования, когда две и более совместно рассчитываемые методики обмениваются данными в обе стороны.

В состав модульной интеграционной платформы входит модуль транспортного уровня Cooperative Computation Framework (CCF), который обеспечивает взаимодействие между математическими методиками ЛОГОС в процессе расчета связанной задачи. CCF характеризуется следующими возможностями: наличием программного интерфейса пользователя для обеспечения взаимодействия с математическими методиками ЛОГОС;

 поддержкой протоколов МРІ [2] и файлового обмена для передачи информации между математическими методиками ЛОГОС;

 передачей сеточных величин с использованием интерполятора между методиками на каждом шаге обмена;

 обменом командами между математическими методиками ЛОГОС.

Схема использования ССГ

На рис. 1 приводится общая схема использования ССF.



Рис. 1. Схема использования ССГ

Данная схема предполагает следующее:

 конфигурирование совместного расчета производится через конфигурационный файл формата YAML [3], который заполняется в графическом конфигураторе (Интеграторе);

 внедрение ССГ в методики осуществляется с помощью программного интерфейса пользователя ССГ АРІ;

- за обмен данными между методиками отвечает ядро CCF.

Программный интерфейс пользователя

Чтобы обеспечить расчетным методикам ЛО-ГОС взаимодействие друг с другом с использованием различных транспортных уровней МИП предоставляет программный интерфейс пользователя ССF АPI.CCFAPI предполагает следующее:

 интеграцию в связываемые методики для использования ими транспортного слоя;

 обеспечение поддержки внедрения в программные коды методик на языках С, С++, Fortran;

 наличие возможности собранным с поддержкой ССГ методикам запускаться в зависимости от конфигурации запуска как в составе связанной или сопряженной задачи, так и независимо в качестве отдельного счетного модуля.

Для использования транспортного слоя CCF в методиках разработчикам необходимо:

 включить в свои файлы исходного кода заголовочный файл, содержащий объявления функций ССГ АРІ;

 линковать своё приложение с динамической или статической ССГ библиотекой.

Библиотека прикладного программного интерфейса ССГ АРІ предоставляет разработчикам методик базовый набор функций, обеспечивающий основную функциональность ССГ АРІ, которые делятся на следующие группы:

функции управления совместным расчетом.
К ним относятся:

методы, которые инициализируют и завершают совместный расчет (CCF_Init(),CCF_Finalize() и др.),

методы синхронизации (CCF_Synchronize(), CCF_ForceSynchronize()),

работы с модельным временем (CCF_SetSynchronizationDeltaTime(),CCF_SetStartTime) и др.), а также с участниками обмена;

 функции установки геометрии счетной модели. К ним относятся функции, которые обеспечивают интерфейс передачи информации о сеточной геометрии для запущенной методики (CCF SetMesh3D(),CCF SetSurface3D() и др.);

функции работы с данными.

Среди них:

методы, которые проверяют наличие именованных данных у участников обмена (CCF_CheckDataPresence()), добавляют публикуемые данные как буфер (CCF_AddData()),

инициируют дополнительный обмен информацией о доступных данных у всех участвующих методик(CCF_PublishData()),

методы, которые предоставляют доступ к полученным данным, как с предварительной обработкой, так и без, а также возвращают размер этих данных;

– функции подписок и запросов.

Такие функции предназначены для работы с подписками и запросами на публикуемые данные;

функции для управления загрузкой интерполятора.

Кроме базового набора функций, библиотека включает в себя определенные разработчиками типы данных (тип идентификатора совместного расчета, тип запроса данных и т. п.) и перечисления, которые определяют тип сетки, коды команд, принимаемые и обрабатываемые при входе в синхронизацию участников и т. д.

Ядро ССГ

Основными классами ядра ССГ являются:

– ccf_base_participant – базовый класс участника совместного расчета, от которого наследуются классы ccf_mpi_participant, ccf_file_participant для связывания по интерфейсу MPI и последовательно через файл, соответственно, как показано на рис. 2.



Рис.2. Наследники класса ccf base participant

Данный класс обеспечивает инициализацию совместного расчета, владеет объектами межпроцессного взаимодействия, хранит описание участников совместного расчета, отслеживает продвижение участника по модельному времени, обеспечивает публикацию данных, организует доступ к хранилищу полученных данных и предоставляет доступ к выбранному интерполяционному интерфейсу;

– ccf_base_ipc – базовый класс механизма межпроцессного взаимодействия (interprocesscommunication – IPC) участников совместного расчета, от которого наследуются классы ccf_mpi_ipc и ccf_file_ipc, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Наследники класса ccf_base_ipc

Данный класс предоставляет универсальный механизм передачи данных от одной методики в другую, добавляет полученные данные в хранилище ccf_data_pool, обеспечивает синхронизацию с использованием выбранного типа межпроцессного взаимодействия;

 – ccf_data_pool – класс-хранилище данных, полученных в момент синхронизации от соседних участников совместного расчета. Класс обеспечивает регистрацию запросов и подписок на данные соседних методик, хранение получаемых данных в процессе межпроцессного взаимодействия;

 – ccf_interpolator_interface – интерфейсный класс интерполяционных методов (сопоставление соседей, расчет и применение интерполяционных коэффициентов).

Схема управления связанным расчетом

Управление связанным расчетом выполняется по следующей схеме:

 чтение конфигурационного файла формата YAML, если такой файл представлен в системе.
Конфигурационный YAML-файл позволяет, задать режим работы CCF, выбрать требуемый интерполятор данных (FSI, Remap), задать физические величины, подлежащие обмену;

 инициализация совместного расчета из конфигурационного файла формата YAML с помощью функции CCF_InitFromConfig(), если файл был прочитан на шаге 1, или с использованием параметров по умолчанию;

 инициализация требуемого модуля в соответствии с переданными параметрами и в зависимости от режима совместного расчета: параллельного или файлового обменов с помощью функции CCF Init():

– проверка функцией CCF_Initialized() инициализации совместного расчета с помощью CCF;

обмен даннымина каждом шаге;

завершение участия в совместном расчете с помощью функции CCF_Finalize().

Режим МРІ обменов ССГ

Для параллельного высокоскоростного взаимодействия методик, участвующих в совместном расчете, в составе модуля взаимодействия реализован режим обмена данными и командами с использованием интерфейса передачи сообщений MPI.

Инициализация совместного расчета многодисциплинарной задачи с использованием транспортного слоя ССF может быть условно разбита на следующие последовательные стадии:

 разделение общего счетного поля между методиками и назначение каждой методике уникального MPI коммуникатора;

регистрация всех разделяемых ресурсов методик;

подписка методиками на ресурсы других методик;

 обмен сетками и поиск соседей для обмена данными.

Передача данных от одной методики другой в ходе расчета совместной мультифизической задачи может быть условно разбита на следующие последовательные шаги:

 при получении управления модуль ССГ в соответствии со своими внутренними условиями определяет, что на текущем модельном шаге должна быть активирована передача данных от одной методики другой;

 публичные данные исходной методики в момент MPI-синхронизации передаются на соседние MPI-процессы целевой методики;

 на МРІ процессе целевой методики поступившие данные хранятся в хранилище (пуле) данных ССГ до тех пор, пока целевая методика не запросит их оттуда при помощи заданной функции-обертки.

Пример схемы передачи данных от одной методики другой в ходе совместного расчета с использованием MPI представлен на рис. 4.



Рис. 4. Пример схемы передачи данных от одной методики другой в ходе совместного расчета с использованием МРІ

Режим обмена ССF посредством файловых операций

Методики, во время проведения мультидисциплинарного расчета, могут выполняться на разных узлах локальной сети на различных программных платформах. Для управления совместным расчетом в такой ситуации целесообразно выбирать связывание с передачей данных через файлы как наиболее гибкий и универсальный способ обеспечения связи между методиками.

Связывание счетных методик через файловый обмен использует их входные и выходные файлы обмена данными. Интегрированный в методику модуль совместного расчета считывает значения входных параметров из файла обмена в момент инициализации методики. По завершении расчета методики модуль совместного расчета записывает значения выходных параметров, и тем самым передает их дальше по цепочке связанным методикам.

Для работы двух счетных модулей в режиме файлового обмена требуется:

- использование ССF API в счетном модуле;

подготовка двух конфигурационных файлов формата YAML;

 последовательный запуск подзадач, при котором первая подзадача на этапе завершения автоматически сохраняет требуемые данные в файл обмена, а вторая подзадача на этапе инициализации автоматически считывает и интерполирует на собственную сетку данные из файла обмена.

В качестве формата файла обмена используется собственный формат ExLGS – адаптированная реализация формата LGS, используемого в методиках ЛОГОС Аэрогидродинамика для сохранения результатов расчета. Формат ExLGS реализован как параллельный формат и позволяет процессам, использующим ССF API, одновременно записывать свои публикуемые данные в файл обмена. При этом вводится ограничение на превышение 40 одновременных писателей, чтобы излишне не замедлять файловую систему и сетевой интерфейс доступа к ней. Такое же ограничение накладывается и на параллельное чтение файла обмена ExLGS. В дальнейшем количество одновременных писателей/читателей должно быть вынесено на уровень конфигурации совместного расчета в режиме файлового обмена.

Использование интерполяторов

Для расчета значений сеточных величин ячеек целевой расчетной сетки по значениям сеточных величин заданного количества геометрически наиболее близких ячеек исходной расчетной сетки используются интерполяторы.

Программный интерфейс API CCF позволяет работать с интерполяторами двух типов:

– поверхностный интерполятор FSI (FluidStructureInteraction), который позволяет связывать подзадачи через общую интерфейсную поверхность;

 объемный интерполятор Remap, который позволяет связывать подзадачи, рассчитываемые в общем или пересекающемся объеме.

Используемая для связывания методик в режиме МРІ-обменов библиотека FSI-интерполятора «ccf_i_fsi» разработана на базе FSI-интерполятора из библиотеки UnionLib.

При переносе данных с одной сетки на другую посредством файлового обмена используется разработанный программный модуль «ccf_i_remap» на базе интерполятора Remap.

Интерполяторы реализованы на языке программирования С++ с использованием контейнеров STL [4] и специализированной библиотеки работы с поисковыми К-мерными деревьями в виде динамических библиотек, содержащих АРІ интерполятора известного вида.

Обмен командами

Для согласования тактики счета между методиками служат обмены командами. Управляющие команды для согласования тактики счета и обмена состояниями методик посылаются и принимаются методиками в общем случае на каждой итерации совместного расчета и обеспечивают:

 согласование времени следующей точки синхронизации для обмена данными;

- обработку различных ситуаций, а именно:

- повторный расчет итерации;

 синхронизацию чтения/записи данных для перезапуска совместной задачи;

 аварийный останов методик и совместного расчета.

Заключение

В докладе описан модуль транспортного уровня ССF, который позволил обеспечить взаимодействие между собой математическим методикам ЛОГОС в процессе расчета связанной задачи, представлены основные возможности и принципы работы данного модуля.

Литература

1. ЛОГОС [Электронныйресурс]: Пакет программ инженерного анализаи суперкомпьютерного моделирования – РФЯЦ – ВНИИЭФ, [2017-2018] – Режим доступа: http://logos.vniief.ru.

2. MPI Documents [Electronical resource]: Official version of MPI Standard MPI-2.2 / Bill Gropp, University of Illinois. – [S.1.], 2009. Mode of access: https://mpi-forum.org/docs/mpi-2.2/mpi22-report.pdf.

3. YAML Ain't Makeup Language [Electronic resource]: Data serialization standard / Evans Clark . – [S.I.], YAML 10, 2009 – Mode of Access: http://yaml.org/spec/1.2/spec.html.

4. Standard Template Library [Electronic resource]: software library for C++ programming language. – Niskayuna: GE Research, [1994-2017] – Mode of Access: http://cppreference.com.

ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫМИ ДАННЫМИ ИНТЕГРАТОРА ЛОГОС МИП

<u>Е. А. Ескова</u>, А. Д. Черевань, А. Г. Надуев, Д. А. Кожаев

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

Введение

Модульная интеграционная платформа (МИП), входящая в состав пакета программ ЛОГОС, используется для ряда задач, в том числе для подготовки и проведения:

 связанных расчетов комплексных мультидисциплинарных задач математического моделирования;

 задач оптимизации и параметрических исследований.

В состав модульной интеграционной платформы входит Интегратор, который предоставляет графический интерфейс пользователя и выполняет функцию связующей программы, позволяя взаимодействовать в единой логически связанной цепочке всем необходимым модулям. Расчетные данные, используемые Интегратором, могут взаимодействовать с файловыми объектами, и организованы в виде древовидной структуры. Для управления этой структурой данных и отображения ее в Интеграторе, была реализована подсистема «Управления расчетными данными», которая состоит из следующих модулей:

 древовидная структура данных, которая определяет типы объектов и их взаимосвязи;

 контроллер распределенной файловой структуры, который обеспечивает управление расчетными файловыми объектами в локальной и удаленной файловых системах;

 графическое дерево объектов, которое используется для отображения пользователям структуры данных задачи и возможности взаимодействия с отдельными объектами структуры.

Древовидная структура данных

Структура данных, определяет типы объектов и их взаимосвязи. Структура статическая, то есть объекты, которые могут быть в ней созданы, заранее определены и достаточны для решения расчетных задач в Интеграторе ЛОГОС МИП.

Структура содержит следующие элементы:

- типы данных;
- контейнер элементов;
- контейнер связей.

Структура данных храниться в формате xml и должна быть представлена в единственном экземпляре. Для обеспечения её уникальности, структура реализована с использованием шаблона проектирования SingleTone (Одиночка) [1, 130].

Типы данных

Тип расчетных данных, в рамках Интегратора ЛОГОС МИП, представляет собой класс C++, унаследованный от базового класса BaseElement. Такой тип наследования, один базовый класс для всех типов данных, позволяет обеспечить интерфейс для доступа к производному классу, через указатель на базовый класс, а также хранение и обход разнотипных данных. Для гибкого интерфейса копирования/клонирования структура типов данных организована с помощью порождающего шаблона проектирования «Прототип» [1, 121].

В Интеграторе реализованы следующие типы расчетных данных:

- геометрическая модель;
- расчетная модель;
- параметры геометрической модели;
- параметры расчетной модели;
- задача параметрических исследований;
- задача оптимизации;
- расчетная задача;
- результаты расчетной задачи.

Контейнер элементов

Контейнер элементов содержит в себе объекты, созданные в процессе подготовки и расчета задачи. Каждый объект имеет свой уникальный идентификатор в рамках проекта, а так же связь с файловыми объектами. Контейнер элементов выполняет следующие функции:

- хранение объектов;
- добавление/удаление новых элементов;

 поиск элементов данных с указанным идентификатором или типом.

Контейнер связей

Содержит описание связей между объектами, что позволяет выстроить иерархию расчетных данных. Контейнер выполняет следующие функции:

- хранение связей между объектами;
- добавление/удаление связей.

Набор вспомогательных методов для поиска и навигации

Обход и составление структуры дерева объектов реализованы с помощью паттерна проектирования «Визитер» [1, 314]. Использование паттерна Визитер (Visitor) позволяет единообразно обойти набор элементов с разнородными интерфейсами, а также позволяет добавить новый метод (функцию) в класс объекта, при этом, не изменяя сам класс этого объекта. В подсистеме управления расчетными данными интегратора ЛОГОС МИП были реализованы следующие виды визитеров:

 Визитер прямого обхода. На вход подается узел, визитер, перемещаясь вниз по дереву объектов, находит все узлы, заданного типа, а также их взаимосвязи.

 Визитер обратного обхода. На вход подается узел, визитер, перемещаясь вверх по дереву объектов, составляет путь до корневого элемента.

На базе данных визитеров реализованы различные виды поиска, например, поиск элементов по типу и идентификатору.

Контроллер распределенной файловой структуры

Модуль «Контроллер распределенной файловой структуры» предназначен для взаимодействия интегратора с распределенной структурой данных проекта.

Модуль выполняет следующие основные задачи:

 формирует и контролирует структуру данных в локальном и удаленном каталоге проекта;

 контролирует занятость проекта при помощи сигнальных файлов, используемых для оценки статуса расчетов;

 обмен данными между локальным и удаленным каталогами проектов, осуществляемый по запросу пользователя.

Общая структура взаимодействия модуля ProjectDirectory с каталогами проекта представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общая структура взаимодействия ProjectDirectory с каталогами проекта

Каталоги проекта, взаимодействующие с модулем ProjectDirectory:

 Local – каталог текущего проекта на локальном компьютере. Содержит данные для работы с САПР, ППП и оптимизатором; Remote – каталог текущего проекта на супер-ЭВМ. Содержит данные, для расчета оптимизационных задач и результаты этих расчетов.

Модуль ProjectDirectory осуществляет взаимодействие с каталогом текущего проекта на локальном компьютере с использованием локальных файловых операций, а с каталогом текущего проекта на супер-ЭВМ с использованием сетевого протокола SSH.

Алгоритм взаимодействия модуля ProjectDirectory с каталогами проекта на примере подготовки и решения расчетной задачи

Подготовка задачи с вызовом САПР и ППП из интегратора и дальнейшая оптимизация геометрии выполняется на локальном компьютере. При этом выполняется следующий алгоритм:

 создается новый проект, представляющий собой каталог в файловой системе локального компьютера;

запускается САПР в каталоге проекта;

 производится подготовка геометрической модели;

 задаются параметры геометрической оптимизации;

 запускается ППП, в который загружается файл проекта, созданный в САПР;

формируется расчетная сетка изделия;

 задаются сеточные величины и граничные условия;

 выбираются параметры оптимизации и выходные параметры;

- создается расчетная модель;

- формируется файл, который содержит:

 параметры оптимизации, диапазоны и начальные значения;

 целевые функции для выходных параметров и их желаемое значение.

Графический интерфейс пользователя представлен в виде дерева проекта, в соответствии с рис. 2.



Рис. 2. Дерево проекта в графическом интерфейсе пользователя

Дерево проекта в файловой системе локального компьютера представлено на рис. 3.



Рис. 3. Дерево проекта в файловой системе локального компьютера

Дерево проекта в файловой системе локального компьютера содержит директории, обозначенные 0, 1, 2, 3 и т. д. – это уникальные идентификаторы, которые присваиваются каждому логическому объекту в структуре данных дерева проекта.

Модуль ProjectDirectory копирует файлы в каталог проекта и устанавливает связь между скопированным файлом и элементом дерева, хранит в себе описание дерева (главная информация – на какие файлы ссылается тот или иной пункт дерева проекта) и служебную информацию о проекте (в том числе, диапазоны изменения оптимизируемых параметров, пути к решателям).

Необходимо отметить, что ProjectDirectory позволяет получить при помощи сигнальных файлов статус текущего проекта на локальном компьютере – свободен или занят проект другим интегратором.

Для запуска задачи выполняется следующий алгоритм:

 копируется на супер-ЭВМ файл с описанием интегральных параметров;

 – рассчитывается совокупность наборов параметров оптимизации:

- геометрические параметры передаются в САПР,

- параметрические - передаются в ППП;

создается новая расчетная модель в САПР;

– рассчитывается вариант задачи в ППП на основе:

- новых значений оптимизационных параметров,

– новой расчетной модели,

- оригинальной модели;

 обрабатывается следующий набор параметров оптимизации, создается новая расчетная модель и т. д. пока не будут обработаны все наборы параметров оптимизации;

копируется на супер-ЭВМ вариант расчетной задачи.

Каждая поставленная в очередь исполнения задача выполняется, а набор искомых параметров сохраняется в отдельный для каждой задачи выходной файл.

Дерево проекта в файловой системе супер-ЭВМ представлено на рис. 4.

1	
/1429	
/1431	
/1433	
/1435	
/1437	
/1439	
/1441	
/1443	

Рис. 4. Дерево проекта в файловой системе супер-ЭВМ

Модуль ProjectDirectory анализирует каталог каждой поставленной в очередь исполнения задачи на супер-ЭВМ и при появлении выходного файла с набором интегральных величин копирует его на локальную машину в каталог проекта.

Алгоритм построения геометрической и расчетной модели, а также алгоритм построения задачи при решении параметрических задач аналогичны алгоритмам при решении оптимизационных задач.

Графическое дерево объектов

Графическое дерево объектов предоставляет интерфейс для взаимодействия со структурой данных, начиная от геометрии (структуры) изделия, его параметров, результатов расчетов каждого оптимизационного шага и кончая результатами расчетов. Пример графического дерева объектов изображен на рис. 5.



Рис. 5. Графическое дерево объектов

Реализованный интерфейс позволяет выполнять следующие операции:

 добавление/редактирование/удаление объекта в структуре данных;

 клонирование/копирование объектов в структуре данных;

запуск сторонних приложений для определенных типов данных;

доступ к конкретному элементу структуры;

 просмотр результатов задачи, включая результаты на каждом расчетном шаге.

Графическое дерево объектов реализовано на базе Qt с использованием QStandardItemModel и QTreeView.

Заключение

В докладе описана подсистема управления расчетными данными Интегратора ЛОГОС МИП, алгоритмы работы и принципы взаимодействия модулей, входящих в ее состав. Реализованная подсистема предоставляет:

эффективную организацию и хранение расчетных данных задач, решаемых в Интеграторе ЛОГОС МИП;

удобное для пользователей взаимодействие с расчетными данными в процессе расчета задачи.

Литература

1. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Д. Приемы объектно-ориентированного проектирования. СПб.: Питер. 2012.

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ИТЕРАЦИОННОГО АЛГОРИТМА УМЕНЬШЕНИЯ ШИРИНЫ ЛЕНТЫ РАЗРЕЖЕННОЙ МАТРИЦЫ

Н. В. Старостин, В. А. Заиграев

Институт информационных технологий механики и математики ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

В работе рассматривается известная и актуальная задача минимизации ширины ленты разреженной матрицы [1]. Данная задача, в частности, возникает на этапах подготовки разреженных структур (матриц, аппроксимационных сеток, графов) в процессах физико-математического моделирования на Супер-ЭВМ. Размерности практических задач исчисляются десятками и сотнями миллионов строк/столбцов матриц. Уменьшение локальных ширин разреженных структур позволяет сэкономить вычислительные ресурсы, такие как: память под хранение данных, время выполнения расчетов, пересылки данных в коммуникационных средах.

В качестве исходных данных в задаче уменьшения ширины ленты выступает квадратная разреженная симметрическая матрица А. Локальной шириной называют величину, которая соответствует расстоянию между главной диагональю и крайним ненулевым элементом *i*-ой строки $\beta_i(A) = \max_{j=\overline{1,n}} \left\{ |i-j| |a_{ij} \neq 0 \right\}$. А шириной ленты матрицы называют локальную ширину ленты, максимальную по значению $\beta(A) = \max_{i=\overline{1,n}} \beta_i(A)$

Решением задачи является перестановка (матрица перестановок) Р, согласно которой перенумерация строк/столбцов исходной матрицы обеспечивает максимальное сужение ширины ленты $F(P)=\beta(PAP^T) \rightarrow \min$.

По нескольким причинам, для решения этой задачи применяются эвристические алгоритмы. Главная причина – это то, что проблема уменьшения ширины ленты относится к классу NP-трудных проблем [2], то есть для нее не существует алгоритма, решающего ее за полиномиальное время. Также, к использованию эвристических алгоритмов подталкивает большая размерность современных задач, делающая применение прямых алгоритмов неэффективным по объему затрат вычислительных ресурсов: памяти и процессорного времени.

Для практического применения важно, чтобы общее время решения задачи уменьшилось, то есть суммарное время работы алгоритма уменьшения ширины ленты и решения эквивалентной задачи с переупорядоченой матрицей было меньше, чем время решения задачи с исходной матрицей. Поэтому на практике применяются быстрые конструктивные алгоритмы, например, алгоритм Катхилла-Макки, Кинга, Слоана. Общей проблемой названных алгоритмов можно назвать то, что они не позволяют улучшить найденное решение. Задачей этой работы было разработать такой параллельный итерационный алгоритм, который, получая на вход начальное упорядочение трансформирует его так, чтобы значение критерия улучшилось по сравнению с исходным. Один из плюсов выбора итерационного алгоритма является возможность прекратить его работу в любой момент времени с получением определенного результата, до срабатывания условия останова.

В качестве операции трансформации был выбран обмен пары соседних строк и столбцов, обеспечивающий сужение ленточный структуры матрицы.

В целях распараллеливания алгоритма было решено разбить перестановку на отдельные пересекающиеся фрагменты, каждый из которых обрабатывается независимо. Размер каждого фрагмента должен превышать начальную ширину ленты матрицы. Это позволяет гарантировать то, что изменения в текущем фрагменте оказывают влияние только на локальные ленты соседних фрагментов. Пересечение фрагментов необходимо для сохранения возможности перехода вершин входящих в состав одного фрагмента в другой. Для минимизации числа проверок и улучшения скорости работы, была также введена оценка перспективности отдельных фрагментов - под перспективностью понимается потенциальная возможность улучшения локальных лент в рамках текущего фрагмента. Изначально принимаются все фрагменты перспективными. Если после обработки не было совершено ни одного обмена, то фрагмент помечается как неперспективный и далее не обрабатывается. Когда в некотором фрагменте происходит обмен, соседние к нему и он сам помечаются как перспективные. При обработке фрагментов возможно отсортировать их в порядке убывания перспективности, что может быть полезно для экономии вычислительных ресурсов.

Параллельная схема работы алгоритма реализуется методом разбиения всех фрагментов на четные и нечетные в порядке их положения в перестановке. Каждая итерация алгоритма состоит из двух тактов. На первом такте в параллельном режиме обрабатываются нечетные фрагменты, на втором такте – четные фрагменты. Поскольку размер фрагмента гарантирует, что локальные изменения в нем влияют лишь

Название	N	Заполнение	RCM	Iterative		Parallel	
				Лента	Время, мс	Лента	Время, мс
lshp_265	265	1009	19	19	22	19	71
eris1176	1176	9864	183	183	1074	104	1261
bcspwr09	1723	6511	170	80	9413	81	2144
bcspwr10	5300	21842	490	490	17297	179	10065
hvdc1	24842	158426	4251	4251	26103	3295	3528
bcsstk30	28924	1036208	5040	5040	1635	4605	2054
TSOPF_FS_b162_c4	40798	2398220	40287	40207	22210	40218	13687
bcsstk32	44609	1029655	4556	4556	1635	4524	1108
TSOPF_FS_b39_c19	76216	1977600	76067	75866	57682	75832	12167
LeGresley_87936	87936	280523	4734	4734	2753	3159	3945
hvdc2	189860	1339638	3513	3513	27722	3161	4557

i csyndiaidi sanyekod ani ophima

на соседние к нему вершины, в рамках каждого такта обработка всех фрагментов происходит полностью независимо в параллельном режиме.

С учетом распараллеливания работы алгоритма и при ширине ленты меньшей величины $\frac{N}{2\rho}$, ускорение его работы линейно зависит от р – числа процессоров.

Представленный алгоритм был реализован на базе платформы Java SE 9 и протестирован на ПК следующей конфигурации: IntelCoreI7-3520М/8 ГГб ОЗУ. Для тестирования были взяты матрицы различных размерностей (от 180 до 189860) из открытых источников [3]. Начальное упорядочение для каждого запуска генерировалось с помощью конструктивного алгоритма Катхилла-Макки [4]. Затем полученная перестановка и исходная матрица подавались на вход последовательной итерационной схемы, а также параллельной версии данной схемы, работающей в четыре вычислительных потока. Запуски показали, что качество работы последовательной и параллельной схемы сравнимы и позволяют получать улучшение ширины ленты в среднем до 21 % по сравнению с упорядочением Катхилла-Макки. Ускорение параллельной версии соответствует теоретической оценке, и на рассматриваемом наборе задач максимальное время работы составило 14 секунд. Результаты работы алгоритма представлены в таблице.

В дальнейшем, полученный алгоритм будет развит в сторону увеличения размерностей обрабатываемых матриц. В рамках этого развития предполагается переход в сторону многоуровневого алгоритма [5], то есть введения дополнительных этапов, последовательность которых позволит улучшить качество решения и время работы алгоритма. Также перспективно развитие в сторону распределенного алгоритма, который обеспечивает упорядочение разреженных структур практически значимых порядков.

Литература

1. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. Пер. с англ. М.: Мир, 1988;

2. Paradimitriou Ch. H. The NP-Completeness of the bandwidth minimization problem // Computing. 1976 Vol. 16P. 263-270;

3. The University of Florida Sparse Matrix Collection<u>https://sparse.tamu.edu/;</u>

4. Cuthill E., McKee J. Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices // Proc. 24th Conference of the ACM, Brandon Press, New Jersey, P. 157 – 172 1969;

5. Старостин Н. В., Панкратова М. А. Многоуровневые алгоритмы декомпозиции графа данных для параллельных вычислений на гетерогенной вычислительной системе. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2016. Т. 1. С. 60–68.

РЕСУРСОЕМКОСТЬ ПОРОГОВЫХ СХЕМ РАЗДЕЛЕНИЯ СЕКРЕТА ПРИ РАБОТЕ С 256-БИТНЫМИ КЛЮЧАМИ

<u>А. В. Зарубин</u>

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

Введение

На протяжении всей истории человечества всегда была актуальна проблема защиты информации. Каждый человек стремится к сохранности важных ему данных. Например, каждый владелец банковской карты заинтересован в защите своих денежных средств. Однако есть те, кто желает получить деньги других любой ценой. Уже сейчас мошенники используют считывающие устройства в банкоматах, взломы баз данных банков и т. д. Естественно, сами банки применяют многоступенчатые системы защиты от мошенников. И проблема защиты информации не останавливается на банковской системе. Гораздо серьезнее может представляться атака хакеров на сервера министерства обороны. И это далеко не полный список опасностей, которым подвергаются данные в наши дни. Учитывая то, как быстро развивается компьютерная инфраструктура, возрастают вычислительные мощности процессоров, сохранение, передача и защита информации становится одной из самых актуальных задач современности.

В основе многих криптосистем защиты информации лежат программно-аппаратные комплексы (ПАК) и аппаратные модули защиты конфиденциальной информации(Hardware Security Module-HSM). HSM модули основываются на схемах разделения секрета. По таким схемам секретный ключ (разделяемый секрет) путем математических преобразований делится на N частей секрета и выдается N участникам структуры доступа ПАК. Для восстановления исходного секретного ключа необходимо «собрать вместе» K долей секрета (где K < N). Такие схемы называются пороговыми схемами разделения секрета.

За три десятилетия существования, задача разделения секрета превратилась в активно развивающуюся область современной криптографии. Такие системы очень широко применяются в нашей современной жизни, начиная от банковских карт и заканчивая авторизацией на различных сайтах.

В данной работе рассматриваются и анализируются пороговые схемы разделения секрета.

Виды пороговых схем разделения секрета

Схема Шамира

Идея схемы заключается в том, что двух точек достаточно для задания прямой, трех – для задания

параболы, четырёх — для кубической параболы, и так далее. Чтобы задать многочлен степени k требуется k+1 точек.

Для того чтобы после разделения секрет могли восстановить только k участников, его «прячут» в формулу многочлена степени (k+1) над конечным полем G. Для однозначного восстановления этого многочлена необходимо знать его значения в k точках, причем, используя меньшее число точек, однозначно восстановить исходный многочлен не получится. Количество же различных точек многочлена не ограничено. Кратко данный алгоритм можно описать следующим образом. Пусть дано конечное поле G. Зафиксируем n различных ненулевых несекретных элементов данного поля. Каждый из этих элементов приписывается определённому члену группы. Далее выбирается произвольный набор из t элементов поля G, из которых составляется многочлен f(x) над полем *G* степени *t*-1, $1 < t \le n$. После получения многочлена высчитываем его значение в несекретных точках и сообщаем полученные результаты соответствующим членам группы [1].

Важным достоинством схемы Шамира является то, что она легко масштабируема. Чтобы увеличить число пользователей в группе, необходимо лишь добавить соответствующее число несекретных элементов к уже существующим, при этом должно выполняться условие при $r_i \neq r_i$ при $i \neq j$.

Анализ сложности математического алгоритма:

- этап разделения секрета на доли: O (N * K);

- этап восстановления секрета: $O(K^2)$.

Анализ ресурсоемкости вычислений:

- этап разделения секрета на доли:

При расчете значений полинома необходимо просчитывать x^{k-1} где x принимает значения от l до N. Максимальное значение данной операции достигается при K = N > 64. Возьмем K = N = 128 откуда получим $128^{127} = 2^{899} \approx 256^{112} = 112$ байт;

При расчете значения каждого монома в полиноме мы получим операцию $S^* x^{k-1}$, где значение *S* выбирается произвольно из, $2^{32} = 256^4$, откуда максимальная длина значения монома будет 116 байт.

Из вышеперечисленных вычислений следует, что все отдельные операции по вычислению значений мономов полинома требуют операций приведения по модулю.

Значение вычисляемой доли принимает максимальную длину только при финальном сложении значения мономов с секретом. Вывод: для разделения секрета на доли необходимо $N^* |M| + O(|M|)$ байт оперативной памяти для хранения долей секрета;

- этап восстановления секрета:

при расчете значений интерполяционного многочлена Лагранжа будем просчитывать отдельно операции над делимым и над делителем. В общем случае при K = N = 128 получаем произведение $\mathbf{x}^{127} = \mathbf{128}^{127} = \mathbf{2}^{899} \approx \mathbf{256}^{112} = 112$ байт;

При подсчете суммы получаем (512+889)*128 = = 2 кбайт.

Вывод: для восстановления секрета необходимо больше 112 кбайт оперативной памяти.

Схема Блэкли

Две непараллельные прямые на плоскости пересекаются в одной точке. Любые две некомпланарные плоскости пересекаются по одной прямой, а три некомпланарные плоскости в пространстве пересекаются тоже в одной точке. Вообще п – мерных гиперплоскостей всегда пересекаются в одной точке. Одна из координат этой точки будет секретом. Если закодировать секрет как несколько координат точки, то уже по одной доле секрета (одной гиперплоскости) можно будет получить какую-то информацию о секрете, то есть о взаимозависимости координат точки пересечения.

Схема Блэкли в трёх измерениях: каждая доля секрета - это плоскость, а секрет – это одна из координат точки пересечения плоскостей. Двух плоскостей недостаточно для определения точки пересечения [2].

Схема Блэкли менее эффективна, чем схема Шамира: в схеме Шамира каждая доля такого же размера как и секрет, а в схеме Блэкли каждая доля в t раз больше. Существуют улучшения схемы Блэкли, позволяющие повысить её эффективность.

Анализ сложности математического алгоритма:

– этап разделения секрета на доли: O(K * N);

– этап восстановления секрета: $O(K^3)$.

Анализ ресурсоемкости вычислений:

- этап разделения секрета на доли:

секретная точка Q составляется как вектор из Координат максимальной длины равной |M|, откуда мы получаем объем памяти для хранения данной точки равный K * |M| = (в максимальном случае) == 128 * 64 = 8192 байта, откуда получаем, что всякая точка (уравнение гиперплоскости) будет занимать 8192 байта.

Вывод: для разделения секрета на доли необходимо $N^* K^* 64 = 1$ Мбайт оперативной памяти;

этап восстановления секрета:

Для восстановления секрета необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений. Единственным допущением является то, что найти необходимо всего 1 неизвестное, а именно первое, которое и является секретом. Наилучший вариант для целочисленной арифметики является метод Крамера. Для вычисления значения 1 неизвестной необходимо просчитать 2 определителя матриц размерности. Вычисления производить в поле, откуда размером промежуточных значений можно пренебречь (не превышают длину удвоенного модуля).

Вывод: для восстановления секрета необходимо K * N * 64 = 1 Мбайт + 128 байт оперативной памяти.

Схема Карнин – Грин – Хеллмана

В 1983 году Карнин, Грин и Хеллман предложили свою схему разделения секрета, которая основывалась на невозможности решить систему с m неизвестными, имея менее m уравнений.

В рамках данной схемы выбираются n + 1тмерных векторов V_0 , V_1 ,..., V_n так, чтобы любая матрица размером т×т, составленная из этих векторов, имела ранг т. Пусть вектор U имеет размерность т.

Секретом в схеме является матричное произведение $U^T \cdot V_0$. Долями секрета являются произведения $U^T \cdot V_i$, $1 \le I \le n$.

Имея любые т долей, можно составить систему линейных уравнений размерности $m \times m$, неизвестными в которой являются коэффициенты U. Решив данную систему, можно найти U, а имея U, можно найти секрет. При этом система уравнений не имеет решения в случае, если долей меньше, чем т [3].

Анализ сложности математического алгоритма:

- этап разделения секрета на доли: O (N);

– этап восстановления секрета: $O(K^3)$.

Анализ ресурсоемкости вычислений:

- этап разделения секрета на доли:

Так как секрет представляется в виде матричного произведения 2-х векторов, то объем оперативной памяти для хранения координат вектора не превышает модуля и равен 64 байта.

Вывод: для разделения секрета на доли необходимо $(N + 1) \cdot 64 = 8256$ байт оперативной памяти;

- этап восстановления секрета:

для восстановления секрета необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений. Наилучший вариант для целочисленной арифметики является метод Крамера. Для вычисления значения необходимо просчитать определителей матриц размерности. Вычисления производить в поле, откуда размером промежуточных значений можно пренебречь (не превышают длину удвоенного модуля).

Вывод: для восстановления секрета необходимо $N \cdot 64 = 8192$ байт оперативной памяти.

Схема Асмута – Блума

В 1983 году Асмут и Блум предложили схему разделения секрета основанную на китайской теореме об остатках. Для некоторого произвольного числа вычисляются остатки от деления на последовательность чисел, которые раздаются сторонам. Благодаря ограничениям на последовательность чисел, восстановить секрет может только определённое число сторон [4]. Схема Асмута – Блума является доработанной схемой Миньотта. В отличие от схемы Миньотта, её можно построить в таком виде, чтобы она была совершенной.

Анализ сложности математического алгоритма:

- этап разделения секрета на доли: O (N);

– этап восстановления секрета: *О (К2)*.

Анализ ресурсоемкости вычислений:

- этап разделения секрета на доли:

Каждое простое число di занимает объем оперативной памяти больший размерности модуля, но меньший удвоенного модуля ($|di| \approx 100$ байт);

Для проверки условий на нахождение di необходимо $2 \cdot K \cdot |di| = 25600$ байт = 25 кбайт оперативной памяти;

Объем оперативной памяти для $M'|M'| = |di| \cdot K =$ = 8192 байта = 8 кбайт;

объем оперативной памяти для хранения 1 доли секрета = $|P| + |di| + |ki| \approx 192$ байта.

Вывод: для разделения секрета на доли необходимо 192·128 + 8192 + 25600 = 58368 байт = 57 кбайт оперативной памяти.

- этап восстановления секрета:

Для восстановления секрета необходимо 24576 байт для хранения параметров и около 5 $\cdot |P| = 320$ байт для вычислений.

Результаты исследования схем разделения секрета

Опираясь на сделанные расчеты сложности и ресурсоемкости можно определить наиболее оптимальную пороговую схему разделения секрета.

Схема Шамира является системой с самым низким объемом занимаемой оперативной памяти, так же при увеличении количества участников, на которые делится секрет система не становится более сложной для вычислений, так как для этого достаточно добавить соответствующее число несекретных элементов к уже существующим.

Наиболее неэффективной пороговой схемой разделения секрета является схема Блэкли. Основной ее недостаток в том, что в ней каждая доля секрета в несколько раз больше самого секрета, вследствие чего, она имеет самый большой объем занимаемой оперативной памяти.

Схема Карнин – Грин – Хелламана отличается тем, что восстановить секрет может только полная группа участников, что существенно повышает ее надежность. Однако при повышении количества участников увеличивается количество уравнений, необходимых для восстановления секрета, что пагубно сказывается на ее сложности, а в следствии и на быстродействии.

Схема Асмута – Блума основывается на китайской теореме об остатках, вследствие чего имеет хорошее быстродействие и простой расчет при большом количестве участников, однако, является не самой оптимальной схемой в плане объема занимаемой оперативной памяти.

Принимая во внимание примерно равную производительность каждой системы, и, используя результаты проведенных исследований, можно определить и сопоставить параметры ресурсоемкости, составив таблицу. Данная таблица сформирована с учетом того, что возможное количество участников в пороговой схеме разделения секрета должно быть не меньше 64 ($N \ge 64$), так как это является одним из требований по минимальному количеству участников, определяющих надежность схемы. При этом необходимое пороговое количество участников для восстановления секрета не должно превышать общее количество участников ($K \le N$).Секретом являлся 256-битный ключ.

	Объем зани- маемой опера- тивной памяти при разделе- нии секрета	Объем занимаемой оперативной памяти при восстановление секрета
Схема Шамира	12 кбайт	> 112 кбайт
Схема Блэкли	1 Мбайт	1 Мбайт + 128 байт
Схема Карнин – Грин – Хеллмана	≈8 Кбайт	8 кбайт
Схема Асмута – Блума	57 кбайт	24 кбайта-хранение параметров 320 байт-вычисление

Результаты исследования схем разделения секрета

Заключение

В данной работе проведены исследования основных пороговых схем разделения секрета на основе определения параметра ресурсоемкости каждой схемы.

Основываясь на результатах исследования определено, что схема разделения секрета Шамира является наименее ресурсоемкой схемой. Данную схему, как одну из самых быстродействующих и менее требовательную к ресурсоемкости программно-аппаратных обеспечения, можно успешно применять в пороговых криптосистемах ПАК.

Литература

1. Shamir A. How to share a secret // Com. Of the ACM. -1979. - Vol. 22, No11. - P.612-613.

2. Blakley G. R. Safeguarding cryptographic keys // Proc. Of AFIPSNasional ComputerConference. -1979. – 48. – P.313-317.

3. C. Asmuth, J. Bloom. A modular approach to key safeguarding // Information Theory, IEEE Transactions on. -1983. - B. 2. - T. 29.

4. Carnin E. D., Greene J. W., Hellman M. E. On Secret Sharing Systems // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1983. – V.29. – №1. – P.231-241.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОЙ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А. М. Анфимов, <u>И. Н. Кирилов,</u> Д. В. Кузнецов, С. Л. Осипов, М. В. Гусев¹, А. А. Кечков¹, С. В. Сумароков¹

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород ¹ИБРАЭ РАН, Москва

Введение

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и при авариях осуществляется путем выполнения связанных теплогидравлических, нейтронно-физических и термомеханических расчётов. Для проведения такого рода расчетных исследований используются интегральные коды СОКРАТ-БН и ЕВКЛИД, а также коды, моделирующие отдельные физические процессы [1].

В последнее время расчетным исследованиям в обоснование безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах присущи следующие современные тенденции развития:

 – рост числа расчетов и их сложности, увеличение объема хранимых и обрабатываемых данных;

 необходимость длительного хранения утвержденных результатов и данных моделирования, большое количество используемых расчетных кодов;

 необходимость проведения расчетов на высокопроизводительных вычислительных ресурсах. В данном докладе рассмотрены вопросы применения системной оболочки (СО), интегрирующей работу кодов различного функционального назначения в единой информационной среде, что снижает трудоемкость выполняемых работ, при сохранении качества выполнения расчетов.

Проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов

При организации и проведении расчетных обоснований у пользователей расчетных кодов возникают проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов, которые схематично представлены на рис. 1.

Наличие такого рода проблем приводит к увеличению трудоемкости выполняемых работ в рамках обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах, повышению требований к квалификации сотрудников и возникновению ошибок при проведении расчетных исследований.

Для решения изложенных выше проблем необходимо и целесообразно создание единой расчетной платформы обоснования безопасности реакторной установки БН. Данная платформа должна выполнять следующие функции:



Рис. 1. Проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов

 – автоматизация управления расчетными данными (сбор, структурирование, централизованное и защищенное хранение, поиск, подготовка для визуализации и т. д.);

– унификация механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем (в том числе собственной разработки) и вычислительных ресурсов;

 – автоматизация, организация и регламентация совместной работы всех участников (в том числе территориально удаленных друг от друга) процессов проведения расчетных обоснований;

 – сохранение и автоматизация методик моделирования (процедур расчетного обоснования) в том числе организация хранилища и систематизация расчетных кодов).

Системная оболочка

В рамках реализации этой расчетной платформы специалистами ИБРАЭ РАН совместно с АО «ОКБМ Африкантов» и РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана СО [2, 3].

СО предназначена для организации и проведения расчетов с использованием как кодов нового поколения, так и других специализированных расчетных кодов собственной разработки, проектных кодов, коммерческих расчетных систем. СО включает в себя средства подготовки входных данных, механизмы для запуска, управления и мониторинга расчетов на вычислительных ресурсах различного уровня, инструменты обработки результатов расчетов. Потенциальными пользователями системной оболочки являются предприятия И научноисследовательские институты, широко применяющие компьютерное моделирование при обосновании конструкторских решений, вычислительные центры, предоставляющие услуги и вычислительные ресурсы для проведения расчетов.

Схема функционирования СО представлена на рис. 2.

Основными преимуществами использования СО являются:

 – централизованное и упорядоченное хранение и доступ к данным моделирования с отслеживанием версионности и контролем прав доступа;

 – единая точка доступа и унифицированные механизмы взаимодействия со всеми расчетными кодами, средствами подготовки входных данных и визуализации результатов;

 простые процедуры взаимодействия с вычислительными ресурсами – все механизмы взаимодействия реализуются средствами системной оболочки и скрыты от пользователей;

 – широкие возможности по наращиванию функциональности системной оболочки за счет простой и быстрой интеграции дополнительных расчетных средств без их модификации.

Опытная эксплуатация СО

Для подтверждения работоспособности и правильности функционирования СО при проведении расчетов с использованием кодов нового поколения в 2016 году в АО «ОКБМ Африкантов» была проведена ее опытная эксплуатация.

Опытная эксплуатация СО включала в себя несколько этапов:

 – обучение пользователей (изучение сопроводительной документации и демонстрация специалистами ИБРАЭ РАН основных функциональных возможностей СО);

 – опытная эксплуатация административных функций СО (установка и настройка актуальной версии СО, регистрация расчетных кодов и пользователей);

 – опытная эксплуатация пользовательских функций СО (указание индивидуальных пользова-



Рис. 2. Схема функционирования СО

тельских настроек и структуры хранения данных, регистрация локальных пре / постпроцессоров и проведение локальных и удаленных расчетов расхолаживания реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем).

Опытная эксплуатация пользовательских функций СО представляет наибольший практический интерес с точки зрения непосредственного использования системной оболочки применительно к расчетным исследованиям.

В рамках опытной эксплуатации пользовательских функций СО были выполнены расчеты следующих режимов:

 – расхолаживание на естественной циркуляции (ЕЦ) реактора БН-600;

– потеря системного электроснабжения реактора
 БН большой мощности;

– начальная стадия тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности.

В виду того, что для проведения локальных и удаленных расчетов с использованием СО используются различные адаптированные версии расчетных кодов, было проведено сравнение результатов расчетов с целью подтверждения их соответствия.

Расхолаживание на ЕЦ реактора БН-600

Локальный и удаленный расчеты режима расхолаживания на ЕЦ реактора БН-600 с использованием СО на базе ANSYS EKM, а также независимый от СО расчет на ПК выполнялись кодом HYDRA-IBRAE/LM/V1.

В качестве исходных данных для расчета режима расхолаживание на ЕЦ реактора БН-600 использовалась нодализационная схема установки БН-600, подробно описанная в верификационном отчете кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 [4].

Исходное состояние реактора соответствовало работе на уровне мощности 50 % от номинальной. В начале эксперимента отключились главные циркуляционные насосы первого и второго контуров (ГЦН-1, ГЦН-2) всех петель одновременно. По сигналу снижения оборотов ГЦН-1 сформировался сигнал быстрой аварийной защиты, в результате чего в активную зону (а. з.) были введены стержни аварийной защиты (АЗ). После этого были отключены секции пароперегревателя, и расхолаживание осуществлялось через испарители парогенератора (ПГ). Регулирование расхода питательной воды осуществлялось оператором с помощью регулирующих клапанов. В результате эксперимента было установлено развитие ЕЦ в первом и втором контурах РУ.

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 3, где представлена температура натрия на выходе из а. 3. Из рис. 3 видно, что результаты расчета с использованием СО удовлетворительно совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.



Рис. 3. Сравнение результатов расчета режима расхолаживания на ЕЦ реактора БН-600 с уровня мощности 50 % N_{ном}: ∆ – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (независимый от СО расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (локальный расчет с использованием СО), 2 – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (удаленный расчет с использованием СО)

Потеря системного электроснабжения реактора БН большой мощности

Локальный расчет режима с потерей системного электроснабжения реактора БН большой мощности с использованием СО,а также независимый от СО расчетна ПК выполнялись кодом СОКРАТ-БН/В2.

Для расчета данного режима в качестве исходных данных была использована нодализационная схема реактора БН большой мощности, подробно описанная в [5]. В качестве исходного состояния при анализе аварии рассматривается работа энергоблока на четырех теплоотводящих петлях, уровень мощности составляет 100 % от номинального значения.

Потеря системного электроснабжения приводит к отключению ГЦН-1 и ГЦН-2, отключению питательных и конденсатных электронасосов, что приводит к прекращению подачи питательной воды в ПГ.

По сигналу «Потеря системного электроснабжения» реализуется алгоритм «АЗ с подключением системы аварийного отвода тепла», в соответствии с которым:

 сбрасываются все стержни аварийной защиты, вводятся в активную зону компенсирующие и регулирующие стержни (КС и РС);

 запускаются дизель-генераторные установки, осуществляется последовательное подключение потребителей системы аварийного электроснабжения;

 обороты ГЦН-1 снижаются до «0» в соответствии с кривой естественного механического выбега, что приводит к вводу в активную зону гидравлически взвешенных стержней пассивной аварийной защиты (ПАЗ-Г);

 – обороты ГЦН-2снижаются до «0» в соответствии с кривой естественного механического выбега; подключается система аварийного отвода тепла (CAOT): открываются полностью входные и выходные шиберы на каждом воздушном теплообменнике (BTO);

 ПГ отсекаются по третьему контуру и заполняются азотом;

Отвод остаточных тепловыделений реактора будет осуществляться через ВТО САОТ при естественной циркуляции теплоносителя в первом контуре и естественной циркуляции теплоносителя в промежуточном контуре САОТ.

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 4, где представлена температура натрия на выходе из активной зоны. Из рис. 4 видно, что результаты расчета с использованием СО совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.



Рис. 4. Сравнение результатов расчета режима с потерей системного электроснабжения реактора БН большой мощности: Δ – отношение температуры натрия на выходе из а.з. к исходному значению (независимый от СО расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (расчет с использованием СО)

Начальная стадия тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности

Локальный расчет начальной стадии тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности с использованием СО, а также независимый от СО расчет на ПК выполнялись кодом ЕВКЛИД/V1.

В качестве исходных данных использовалась нодализационная схема реактора БН большой мощности, подробно описанная в [5].

В качестве исходного состояния при анализе аварии рассматривается работа энергоблока на четырех теплоотводящих петлях, уровень мощности составляет 100 % от номинального значения.

В качестве исходного события аварии принимается потеря системного и надежного электроснабжения на станции.

Исходное событие приводит к потере функционирования систем и потребителей нормального и надежного электроснабжения. ГЦН-1 и ГЦН-2 отключаются. Обороты насосов снижаются в соответствии с кривой естественного механического выбега до нуля. Прекращается расход питательной воды в парогенераторы. Постулируется отказ управляющей системы безопасности аварийной защиты, вследствие чего отсутствует сброс стержней АЗ, КС и РС, автоматический ввод в работу САОТ. Постулируется также отказ всех пассивных систем остановки реактора (стержней ПАЗ-Г и ПАЗ-Т).

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 5, где представлена температура натрия на выходе из а. 3. Из рис. 5 видно, что результаты расчета с использованием СО совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.



Рис. 5. Сравнение результатов расчета начальной стадии тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности: Δ – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (независимый от CO расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а. з.

к исходному значению (расчет с использованием СО)

Заключение

Для организации и проведения проектных расчетов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и при авариях специалистами ИБРАЭ РАН совместно с АО «ОКБМ Африкантов» и РФЯЦ ВНИИЭФ разработана системная оболочка.

Системная оболочка обеспечивает централизованное хранение и управление всеми расчетными данными предприятия, запуск и управление расчетами, как на ПК, так и на централизованных вычислительных ресурсах. Обеспечивается единый интерфейс управления всеми расчетными данными и расчетными кодами, интегрированными в состав системной оболочки.

Использование системной оболочки позволяет уменьшить время поиска данных повысить степень доверия к хранимым результатам расчетов, сократить время на подготовку и запуск расчетов. В АО «ОКБМ Африкантов» была проведена ее опытная эксплуатация, которая заключалась главным образом в проведении практических расчетов и их сравнении с имеющимися проектными данными.

В виду того, что для проведения локальных и удаленных расчетов с использованием СО используются различные адаптированные версии расчетных кодов, было проведено сравнение результатов расчетов с целью подтверждения их соответствия.

В результате проделанной работы была подтверждена работоспособность и правильность функционирования СО.

Литература

1. Расчетная платформа для обоснования проекта РУ БН-1200 / Е. В. Марова, С. Л. Осипов, С. Ф. Шепелев и др. // Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2016) – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2016. – Т. 2 – С.: 47–53.

2. Гусев М. В., Кечков А. А., Арутюнян А. Р. Система поддержки процессов проведения расчет-

ных обоснований в атомной энергетике // Информационные технологии в проектировании и производстве 2015. № 1. С.21–27

3. Гусев М. В., Кечков А. А., Олисов А. П. Управление процессами расчетных обоснований и их интеграция в единую информационную среду предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве 2016. №1. С.23-29

4.Rtishchev N. A., Chalyy R. V., Semenov V. N., Fokin A. M., Tarasov A. E., Shepelev S. F., Osipov S. L., Gorbunov V. S., Anfimov A. M. «Validation of SOCRAT-BN Code on the Base of Reactor Experiments». Proceedings of the «10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS10)», Okinawa, Japan, 14-18 Dec. 2014.

5. Осипов С. Л., Горбунов В. С., Анфимов А. М., Ртищев Н. А., Чалый Р. В., Тарасов А. Е., Семёнов В. Н. Применение интегрального расчетного кода СО-КРАТ-БН для обоснования безопасности РУ БН-1200 / «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», третья международная научнотехническая конференция: сборник докладов. – М.: ОАО «НИКИЭТ». 2014. – Т. 2. – С. 245–250.

СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ СПРАВОЧНИКОВ ДЛЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

<u>Д. А. Козлов</u>, С. И. Труфанов

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

Введение

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» реализована программа «Создание типовой информационной системы (ТИС) предприятий ЯОК». Одним из необходимых условий любой информационной системы (ИС) конструкторского проектирования (КП) является наличие системы Нормативно-справочной информации (НСИ). Эффективную работу конструкторских бюро и опытного производства обеспечивает централизованное управление инженерной НСИ – номенклатурой материалов, стандартных изделий, технологических данных.

В рамках работ по созданию ТИС ЯОК, в НКБС был создан Центр ответственности по ведению НСИ для КП и технологической подготовки производства (ТПП).

Для решения задач управления НСИ КП и ТПП в рамках создания ТИС были выбраны Корпоративные справочники компании АСКОН: «Материалы и Сортаменты», «Стандартные Изделия», «Универсальный технологический справочник». Все справочники связаны между собой и построены на международных стандартах серии ISO 13584 и 10303. Кроме интеграции в базовой поставке с распространенными системами автоматизированного проектирования существует возможность гибкой интеграции с PDM/ERP-системами предприятия.

В докладе рассмотрены структура и организация работ по наполнению и развитию справочников для КП и ТПП в интересах ЯОК и РФЯЦ-ВНИИЭФ в частности.

НСИ в ТИС ЯОК

В современной автоматизированной системе предприятия ЯОК, включающей в себя множество ИС, НСИ – это сложно организованная система с множеством перекрестных связей между отдельными справочниками и классификаторами. Требования к полноте, точности и актуальности информации в системе НСИ очень жесткие, так как при функционировании любой ИС информационное наполнение прикладных задач зависит от данных НСИ.

Рассмотрим состав электронных справочников, закрепленных за центром НСИ:

• Справочник «Материалы и Сортаменты» (МИС). Справочник является поставщиком данных по материалам и экземплярам сортаментов для цен-

трализованного хранения и использования НСИ о материалах, используемых в организации.

• «Универсальный технологический справочник» (УТС). Справочник является поставщиком данных (свойств, идентификаторов) по инструменту, средствам технологического оснащения (СТО), оборудованию, профессиям, технологическим операциям и предназначен для централизованного хранения и использования НСИ, предназначенной для процессов ТПП.

• Справочник «Стандартные Изделия» (СИ). Справочник является поставщиком данных (3D моделей, свойств, идентификаторов) по стандартным, комплектующим изделиям и предназначен для централизованного хранения и использования НСИ о стандартных и типовых изделиях.

Справочник МИС

При проведении проектно-конструкторских работ, ТПП, подготовке конструкторской документации (КД) в различных сферах деятельности требуется информация о материалах, применяемых при изготовлении изделий. А именно:

 – обозначения черных и цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов, смазок и технических жидкостей;

их физико-механические, технологические свойства, химический состав;

- назначение и области применения;

- возможные заменители и условия замены;

- используемые сортаменты.

Справочник МИС (рис. 1.) содержит указанные сведения, для применения в САD, PDM, MES – системах и позволяет просматривать их и использовать в различных конструкторских и технологических документах.

Справочник МИС может использоваться:

при разработке электронной КД;

• для определения материала – заменителя при разработке технических требований КД;

• при разработке электронных моделей изделий;

• для создания объекта спецификации;

• при выполнении материального нормирования на этапе ТПП;

• при разработке технологической документации;

• для автоматизированного учета данных по материалам в ERP-, MES-, PDM – системах.

Company and Managata International 2018			-		- 0	-
Филл Бидинтор Вид Шиструленты Серенс Странов						
coli dire di la sila						
Referenced of any Barrane, a recent distance serves all present a recent of	Contraction of Contract in Contraction of the	American	Crown 816 (200	T 47 Viert for and	Charges in Internal FOCT 216	124-2
	Conference I descent and a second					
	Concert Management and a	The second second	With the lot			
12 all Comm MACTOCT 4204-37	Bot choicens	U.V. BRID	C. P. C.	10. · · · · ·		
III gd Chnat AMr310C1 4784-87	Hanmotaur		Seene	Easter.	Kotect	
H 📣 Chim AM-6 FOCT 4784-57	Driessiferitunde cyatrike	15		1	Saramar (Faperies	
18 JB Crises AMu (OC1 4704-87	Comocra .	277		4//hi)		
18 J Const 833% FOCT 4794-97	Справа провость Принина	e corps. 4.6	-1	Пa	Sacama+ cragenae	-6
(#- #P Christel #33th DCT 1 50025-80	Предел такунести	3.98	-1	ne .	5863/0-0+ CT 8049448	-1
III de Come Dis FOCT 4784-57	Codure sercroses					
Contract for administrative chapter (TOCT 1982) 40	Capito a new particular (4)	160.9		1		-1
There a bit a more set of a minister and a minister of the CT 127	Capito a serie de la capito de	05		2		-1
Given Sea and an and an and a second strategy of the second secon	Collidia sama v bayanna (2)	0.5		2		-
Thereibes also areasense chrosoel FOCT 17232-89	Coperative stations plot	12.	18	1		
Провить (прессованный принку слоного равнополония)	Coperate state and a local	28-48		8		
- E Upotera Ppeccaaesa rpakoy usesa estateorere	Contrare reput			1		
 I (Doprie) (beccopares) uple cit cares) inclaimed on the 	Copic a sea reacts (4)	01		4		
Toolers (concernance) of an annual for	Coordination Line (L)	01		12		
Topos Inscrimenti la annessa composition			C. C. C. C. C.			
- 3 Tayle (Systematics also were that choose (FOCT 2070)	N 42		Copriment Patentas			
3 Tayfa Siz anxieter rpeccelarian spyrnoro present PC	Типоразивры	 A Model (1997) 				
Пруба (круг лак бесшевная конциндерское врованная на	2.5+1500+4000				and Street Street or	10
Tpyfa (ceap-cer rpm-cause-cer (FOCT 23697-79 #	2.5x2000x3000		P 1067	TIER M 2.56200KB	X010C121931-76	
26 Upening bio and events change (10c1 13c219) in all from Profit Cost and an	2.5x2000x7000	180	l fact	21EA 1 25/2006/30	00100121631-76	-14
is the Court Diff. (DCT 470457	1		l fuer	Д165 M 2.5-2000-2	00//0CT 21631-76	
10 40 Cham 010 FOCT 4714/97	3+1000+2000	3	I fier	ETERT 25-2000-30	007007 21629 76	74
н 🔊 China Д20 ОСТ 1 30043 90	3.4450,500E		10			
4 million 18	Ripe-etp			Jonese		- 6
O Contractor	o Kas					4
and a second sec	C Marques	Crissie 216 D	10.7 4794 67			-8
CE Otpaliense	Ein gemet bis searageaus	TOCT 4794-5	Alteresti vi	financi anto essentica	денски-неулеми. Марки	
X topus	S Citations	Tuch 5+0 440	LARGERED (VIN	mim110C1 25525-76		-1
Docymente .	Divigent set coptia-ene	10,121631-	IN THE PARTY OF A	Contraction in the second	No Chinese Thesheories	1
Big mecks copports						
fering (3) these						
						_

Рис. 1. Справочник МИС

Справочник МИС состоит из следующих основных классификаторов:

- материалы;
- сортаменты;
- обработки;
- формы;
- документы.

Отраслевое наполнение справочника МИС выполнялось центром ответственности по ведению НСИ с 2013 года по 20 отраслевым ограничительным перечням. При этом проанализировано около 2100 нормативных документов (НД), введено более 67000 экземпляров сортаментов.

В справочнике предусмотрена простановка признака применяемости материалов и сортаментов в ЯОК по основной тематике и на предприятии при реализации других контрактов. Для позиций справочника, используемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ, реализована связь с MDM-системой через GID-коды, которые позволяют передавать информацию о материалах в ERP-систему.

УТС

УТС является поставщиком данных по инструменту, СТО, оборудованию, профессиям, технологическим операциям. УТС используется для централизованного хранения и использования НСИ, предназначенной для процессов ТПП. Главный интерфейс УТС представлен на рис. 2.



Рис. 2. Главный интерфейс УТС

УТС является единой средой для хранения, доступа и обработки технологических данных, используемых в процессах КТ и ТПП. Справочник обеспечивает полноценное централизованное или коллективное управление справочными данными и документами с учетом разграничения доступа субъектов к объектам доступа в действующей политике безопасности автоматизированной системы предприятия.

УТС обеспечивает: оперативный доступ более чем к 70 специализированным технологическим базам данных (БД). Представлены паспортные данные на различные модели оборудования для механообработки, штамповки, термообработки, сварки и т. д.

В работе можно использовать:

классификатор технологических операций и переходов;

• более 60000 типоразмеров инструмента;

• более 2000 типоразмеров станочных приспособлений;

 около 300 моделей грузоподъемных приспособлений;

• более 150 марок материала режущей части РИ;

• классификатор профессий;

 около 910 марок СОЖ и вспомогательного материала;

 около 550 моделей средств индивидуальной защиты и многое другое.

ВУТС введены типовые технологические процессы, инструмент, оборудование и приспособления в соответствии с отраслевыми НД (ОСТ В95, ОСТ 95).

Справочник СИ

Корпоративный справочник СИ является поставщиком данных (3D моделей, свойств, идентификаторов) по стандартным, комплектующим изделиям и предназначен для централизованного хранения и использования НСИ о стандартных и типовых изделиях. Главный интерфейс корпоративного справочника СИ представлен на рис. 3.

🛪 🖉 ڬ 🕸 🔲 🗆 L 💷 I	🗆 😧 🖲		
Y 💷 🗧 🎯 🙀	Ораннитски колтороч	Res 2004-0pc/5.23,14(1)	712-11 007 95 1415-73
😑 детани и аркатура труби розваки	В Отображение		
🔚 Детали и узлы сосудов и апсератов			Cia sap son
😑 детали кралланик трубогроваци и кабалай	В Колструкция и разлер	~	
🦰 Детали внежно- и гидросигтен	- ganafoural		65
Кранскарскарских	-Номыссказо	erp peudard	21
F Kponosou rugonek OC192	-Itte profesp		x
Соднатьски и детяли нашен	Kowrypyed and is between	ынНатарыалы	
н 🚞 стандалтные изделия яск.	Deservative not	ph/Thid	Сколнов из колтних растаров
🖹 🛀 Детали кретехные	1 Decrementer wat	Aruana	CTASK 14(1710 FOCT 5032-72
5, Болтн ОСТ 95 1475-73 илт 1 кариант А	(brane)	Text and a	Избраново Масси
- 4. barra OCI 55 1155 /3 xur 2	Chowware	Fort 2424-Sep\$5.21, 14(1)	71
5, Forme OCT 95 (415-73 am 3	Kog suggress	(Nog the second)	
- 4, barrar OC1 05 2125 /Swar Slapmann 6	VARATAS	0 "How is V4 PAGE TAG	r4
5, Same OCT 95 (400-73	Marca	0,3188	
5. солты с каздратьой головкой са. с нес. техн//	Типорежиср	2H21 Opx05 23 19(17) 12 1	
to- Demo	Unit nutrieuro	Fort	
E 🛀 Delesi	Каранация	Статвартные коволом	
10- 🔁 Sauranor			
E LINDH			
de 🔁 Linsurer			
tal 🔁 Elimpica			
🗄 🎦 Летали общегрознашенного признения			
b) 😑 детам акспротехническа опальчения			
🗄 🏧 Контейнеры и тара			
ын 🧮 Сборонно эконнуатадионное оборудоватие			
Cranapro/DN			
Стандарты 190			
Р 🚍 Электрические алтараты и аркатура			
🚰 אאיארארא מאאר איז			
HOULINGING			

Рис. 3. Главный интерфейс корпоративного справочника СИ

В справочник СИ введены все виды крепежных изделий в соответствии с отраслевыми НД. Для интеграции с ECAD Altium Designer справочник СИ содержит библиотеки электрорадиоизделий (ЭРИ), соответствующих ограничительному перечню РТМ 95 3212-76. Классификация объектов в справочнике соответствует электронной компонентной базе, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники (ЭКБ 2016). Интерфейс раздела ЭРИ справочника СИ представлен на рис. 4.

2 ata 1 53 (20)	Organizational represent	fice periode		
	Peaking (C C2-33-0, 125-61, 9 x De # 1 % & 7 4	HT CIRC. 467.015 TV CIRC. 467.138 TV	F
- Topres 20	· Orafgenment	and a logic shirt of the logic has a	a state and a state of the stat	-
a Stationaria CP4	- Income	2.0	a second second	
👔 늘 365 02 Marpoorena anterpaturale	· Kentronian in parente			
🕸 😓 343 03 fb-dopu horyrponce-exampt	Zonyciaense snichtenen	e	5	
🖶 🖕 343.04 Гриборы отгозлостронные	10000-to universe realized	1		
👔 🛄 343 03 Miguelatigas presidente anglikare	Construction of the local distance	etel di	d star	
🛊 늘 948-11 Приборы пьехолектрические и фильтры электрон	Epyrena no TKC		1	
🖗 ڬ 345 L1 Резистиры и конденсаторы	CTORDCTS II HETTITECH	1007273130	Cale Contractor	
El 🔤 1 Pesi-Crapii	Carson and a second			
Internet		10		
1111Merpomore-euro				
E PERKITONI C2-288 CM3.467.099 TV				
EI C PERKTODI C2-33 CIKD. 467.083 TV				
PERCTORN C2-33-6, 125 CIND. 467.093 TV				
// Реисторы С2-33-6,25 ОКВ. 467,013 Ту				
PERCINEN C233-6,5 CIRD, 467,053 TV				
Pesicropai C2-33-1,0 GR0. 467.083 TV				
Peterspectope C2-33-3,0 GR0. 467,093 TV Biometry C1-3344,0 UK 097, 467,093				
Providence C1 1284 0 18 (181 00 197 00 17)				
Province Chatter Chatter Street At 1981 TV				
Province (2-1041-1-2-000-407-0111				
Fearman (2) 39+5.25 (382, 462,093 Ty				
Fearchigter C2-33H-0,5 CH0, 467,053 TV				
- Peserspe C3-33H-L0 OK0. 467,083 TV				
Personappier C2-339+3.0 C3K0.467.093 TV				
IC., Pesertrater OC P1-12 LIKA6-434123-021 TV	d			
Peaktrope OC CD 10 OHD 467.072 TV				
FERCIDE OCH P1-12 UKAB. 434130.002 TV	riamoun	June of the local division of the local divi	Istalicences Placeto	
PERKITION ODH #1-96 A/DIP. 424115.002 TV	Of card-dead	Peacrop OC C2-33-0,125-41,1	Hole #	
PERCTORN OCH P1/351 A19P. 404130.002 TV	Koa roantesi	Chair on Manes		
C PERCENDER P1-12 (DOM P1-12) AURP.434110	Veraided wall passed	28		
PERKINGNE P1-1212PAE-404111-002 TY	Line Cresulphonegel	Peterchap OC 8/C2-33-0, 125-6	1,9 «O»	
* PERKITORI P1-18 A/187,404(10) 002 TV	Вид резистара	C2-33-0, 128		
PESKCTODE P3-DB1 A208/404120.002 17	Oficial and interdaption	CH0.467.09379		
Personal Control of the second	Terreparent	C2-33-0, 125-61, 9 x0H # 1 %	1041	
E 11 2 Controllation of the Control of the	Bug expense	Реактор		
in the 12 forements	Passel (readeringer	Прочне наделия		
1.3 Teproperative			/	-
🖷 🌄 2 Ko-uto-carropui				
🖷 🧮 3 Сборки на воням реаксторая и конденсатороя				
ar 😂 345 12 Tpercepterations, aportaria, names sagepassa				
a SS 1395genes spery taxoese				
в 🖕 ЖВ 14 Срединители электрические, изделия электранств				

Рис. 4. Интерфейс раздела ЭРИ справочника СИ

Для взаимодействия PDM и ERP систем в справочнике реализована возможность присвоения кодов GID для каждого типоразмера изделия. В ходе работы была разработана технология присвоения кода GID для группы типоразмеров отличающихся рабочими параметрами (формовка выводов, обрезка рабочей части детали).

При наполнении справочника СИ используются параметрические 3D-модели, которые позволяют значительно ускорить процесс наполнения и оптимизировать работу базы данных.

В процессе наполнения справочника СИ проанализировано 1200 НД, введено в справочник 4,5 млн. типоразмеров.

Справочник СИ структурно разделен на несколько модулей:

Дизайнер моделей – модуль, предназначенный для создания и редактирования описаний СИ;

Клиент – модуль, предназначенный для извлечения информации из БД и использования ее в прикладных программах-инструментах;

Сервер – модуль, обеспечивающий работу с БД в распределенном режиме.

На начальных этапах работы по созданию отраслевого наполнения трудоемкость построения

и тестирования одной модели изделия занимала около 2,5 дней. С отработкой методик, созданных в процессе работы, время уменьшилось до 1 дня на изделие. К таким методикам можно отнести:

• Создание таблиц переменных данных для тестирования в Компас 3D. Тестирование 3D модели изделия стало проходить непосредственно на этапе разработки 3D модели, а не на этапе проверки объектной модели;

• Создание универсальных методов описания изделий. При разработке объектной модели однотипных изделий отпала необходимость создания методов описания;

• Создание единой таблицы данных для формовок по ОСТ 95 для ЭРИ. Достаточно только добавить значения типоразмеров ЭРИ, а не создавать проект целиком.

В справочник введены СИ в соответствии ограничительными перечнями ЯОК (479НД).

Процесс ввода состоит из следующих этапов:

• анализируется документация на описываемые семейства изделий и создается паспорт стандартного изделия, где указываются наименование параметрических 3D моделей изделия, взаимосвязь между переменными НД и 2D,3D моделей и прочая информация, необходимая на этапах проектирования объектных моделей изделия;

 создаются параметрические 3D модели в программе Компас 3D. При их разработке создается таблица переменных данных для тестирования в процессе разработки;

• в модуле «Дизайнер моделей» создается объектная модель, которая называется Главной моделью изделия;

 определяются ключевые атрибуты изделия, по которым конструктора и технологи будут осуществлять выбор изделия по типоразмерам. Создание главной объектной модели изделия представлено на рис. 5;

• создаются таблицы переменных данных с указанием в них ключевых атрибутов изделия. Создание таблицы переменных данных представлено на рис. 6;

(2) Character Ration Service Second		COLUMN DE LA COLUMN
Buis Cepter Onersi Organa		
12 12 - 12 12 12 13 13 15 17 10 Q		
+ C Kenv Off	+ Rpane OCT RE CarL PS	
> C Hangestei	Approximate Approximate Approximate	and Management drasters
i 👩 Mersan	Construction of the second	
C Hafegergalement	The second second second	desizes 2113.2016.0540.57
 # 25, 5 (perce ()(1) 85 (185.7) - Dimen. 	Overand	
1 a la Statelate XI merup Statelate XI		
- er igen igenlies		
Westernet an even that must		
The start of the same that the		
Mitch Mitch		
ST thermost, thermost any size a 12st		
Country and Departments		
Big ranne Crowmatter		
P Beptersel parety operall i Bepetersenante		
 		
 Begigterenel auste rängrepentus. Organismusk tum. 		
P Lassa satula 24 Bagat termul tuti		
P Dens que Pl Engertenna fui		
The second second for the second seco		
 Kap 0KT, Cross-sevel two 		
P Harbana P1 Crossmulter		
 Dissembler Opposition 		
P Ofcommune sports Discound test	10.0	
Source of the second state of the second sec		
- P Danmann commun creasants' Disacanation	Speed and	phone:rpaget.
Propert (tapp meet an da) - Securiterend ter		
Pager (Top-the ages Cripticities for		
Tergener, Operation		
 Finder der Berger and DRWC Das and DR 		
C P Department II Investment hat		
C Manual 2723		
1 C Pierceller OCT 818 12214 81		
Distreet UR		
) 🔁 flassetis OCT 95 2723-96.		
P Dolgane (343	1.1	
Tijergenes 1314	1.000	
Pyerol, 1 Bit (Chat	*	Timesee
A CONTRACT OF A CONTRACT OF		
Abarranti Abarranti Altori sera		

Рис. 5. Создание главной объектной модели изделия

equipteur flasses Sections wateres	100	and make										100.0
Capeur Oriene Organia												
a • 7 m 1 a 1 a 1 a 1 a 1 a 1 a 1 a 1 a 1 a 1												
C Fannu 1347		Ryanus 1241 Pas	and the second s									
Y C Manaphanel		Histopean	a nator press	-								
- Conternant		labor status	Property and									
C Habou games		les.		1.	1.	-				1		
A P A Long Lift Parama - Remonser talant		100000	e contra	12		_				11		
P B. Enumeration		1991	2,4 49 (345 ert)			- 28		- 20			- 2	1.04
P D, Beautimenaitiet		2	(2.8 vH (1288 HIL)		- 25	28	100	60	15	. 1		8.52
- P h Department net	- 14	100	12.5 et (9905 etc)		36	10	100	15	39			1.28
- P H. Beartheesaitiet		204	35,8 wit (\$808 erc)		40	68	140	112	- 28		78	1,47
P meta Bruschmeniknet												
T P P Chokoment ten	- 16											
P d Incrementar												
D : Internation												
T.P. Dicember special Deservation	. 18											
* # 25. famme DCT 35 1245-71: Detam												
> p I ⁽¹⁾ Soldwisks 20 Maring Soldwises 20												
r 🖕 🖉 Tasee. TasesDeut												
1 a 2 Report Report												
F State S												
- and stowing to spenn that to												
 In which which 												
. The standards and shows that the standard (1)(1)												
The increase Companying												
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·												
P Expensed paper stor man 11 Incontinue	44	Converse of	and the state of t				et					
- A Regiperiné ante quargentes Organisati tet												
and the second se												Time

Рис. 6. Создание таблицы переменных данных

• атрибуты главной модели привязываются к соответствующим столбцам таблицы. На этом же этапе накладываются ограничения на типоразмеры. Главная модель изделия дополняется необходимыми методами. Далее атрибуты главной модели связываются с параметрами методов. Методы описания главной модели представлены на рис. 7;

Файл Сервис Отчеты Справка						
3 Sa - Sa Sa Sa M M Sa O						
P B Beuectnewswaman	-	Крюки ОСТ 95 1241-73				
		Идентификация Пое	accense	Конфигурация и	CTOTA SOBARINE	Атрибуть
— "Р. h: Вещественный тип — "Р. Н. : Вещественный тип		Avendar	Tue	100	Internet some	
—, Р Н_: Вещественный тип		Al provi	1911	141.50.50	Picifulbayban	ne .
		KOUTING 20	Kpicou I	241.20126	110	
— ¶. Р. Р.: Строковый тип — Р. г: Вещественный тип		KOMITAC 30	Kpickil 1.	241.30	210	
		Matepvan	Материа	In ghin kpiokoe 1241	Да	
P : Staucherstein in in P : Staucherstein in in P : Staucherstein in in P : Doswaressa, sport - Copocessi ten F. p Doswaressa, sport - Copocessi ten P - p Doswaressa, sport - Copocessi ten	- 1	Шаблон спецификаци	Строкее	ON THIS	DENOD	
		МЦХ	мцх		mexist.	
		Раздел спецификации	Строков	ыйтип	Нензв	
		Вид изделия	Строков	NH THI	Неизв	
	-	Типоразмер	Строков	มห์ าทา	Rexso	
> - • Покумент : Документ		Спецификация	Cneuro	кация	Нензв	
> - 2 2 КОМПАС 2D : Крюки 1241.2D LFR		Обозначение стандар	Строков	ษต์ รพก	Нензв	
КОМПАС 30 : Крюки 1241.30	-	Kog OKT	Строкое	ый тип	Неизв	
b - ⊘ ≧II MEX: MEX		SolidWorks 3D	Merog S	olidWorks 3D	HexaB	
Р - 2 В Материал : Материал для кроков 1241		Классификация	Система	в классификации	Нензо	
D - O == Спешифукация: Спешифукация		Types	TypesCla	55	Неиза	
 B. Portransistic university (D): Permanentality 	1	Документ	Докумен	er .	Hexas	
 P Engipernesi pagisa constransa [1]. Remethesi P Remotesia pagisa constransa [1]. Remethesi 		Обозначение	Строков	ษต์ าพา	Нензо	
- • P Внятренный цинфо предприятия : Строковый тип		Дополнительная инфо	Дополни	тельная информац	и Неизв	
 .Р Дляна загиба (h): Вещественный тип 						
 Дополнятельная информация : Дополнятельна 						
- с = Классификация : Система классификации						
HAN P KOLUNIT: LTOOKOBUR THT						Поннения

Рис. 7. Методы описания главной модели

• для правильной вставки обозначения изделия в спецификацию необходимо заполнить соответствующие поля шаблона спецификации необходимыми атрибутами, по которым производится сортировка. Заполнение шаблона спецификации представлено на рис. 8.

Таким образом, атрибуты главной модели изделия сопоставляются со строками структуры типа Компас-3D. Структура типа Компас-3D представлена на рис. 9.

10 1 🙀 * 🖩 1 10 10 10 66 69 10	Calific Description of States	2		
Typer: TyperClass	Нантивниции Поведение	Honorta	contained.	
NOMTAC 2D Kowse 1241 2D UFR	Begewoorte	UTIDH!	si	
 КОМПАС 30 Креки 1241.30 	Tan arpetiyna:	Cripieis	suñ tett	
Marepian Marepian gas specce 1	Revenuer: Kanan OCT 85 1241	1-73		
Create autor Create autor	.Р Арументы 10 о Ж. Классы 🖉 Тай	treas	*245414389271/Wpens*** 0 mpens()+*1////////////////////////////////////	"+" "+ StringToBeal([OSonmavenue "+[Engiment][Des]
Pargeneri parge congrese NI Ingrese and parge congress N Pargeneri and parge constrained Pargeneri and pill featurements Pargeneri and pill featurements Pargeneri and pill featurements Pargeneri (Constantine Pargeneri (Constantine))	Kopens OCT 55 1241-73 Nypes Datysset Marcpeal Creundprompt Marcpeal May Creundprompt Mayrpeand papersy Beyrpeand papersy Beyrpeand papersy Deyrpeand papersy	a p spec copyr Marc boow		

Рис. 8. Заполнение шаблона спецификации

Название	Крепежное изделие	OCT	Ключи	Таблица	
	й номер типа 2.45	414389271000++011		Постоянной д	лины
		1		Переменной д	лин
ок	Выход Справка	J	_	число строк	1
Номер	Название коло	Тип колонки	Диапазон значе	Значение по ум	
1	Наименование	Строка	0	Винт	
2		Строка	0		
3	Класс точности	Строка	0	A	
4		Строка	0		
5	Исполнение	Целый	00	2	
6		Строка	0		
7	Резьба	Строка	0	М	
8	Диаметр	Действительный	00	1.2000000000000	
9		Строка	0		
10	x	Строка	0	x	
11		Строка	0		
12	Шаг	Действительный	00	1.2500000000000	
13		Строка	0		
14	Направление	Строка	0	LH	
15		Строка	0	-	
16	Поле допуска	Строка	0	бе	
17	x	Строка	0	x	
18	Длина изделия	Действительный	00	0.0000000000000	
19		Строка	0	-	
20	Длина резьбы	Действительный	00	0.0000000000000	
21		Строка	0		
22	Класс прочности	Строка	0	58	
23		Строка	0		
24	Сталь (С) или (А)	Строка	0	С	
25		Строка	0		
26	Марка материала	Строка	0	40X	
27		Строка	0		
28	Покрытие	Строка	0	019	
29		Строка	0		
30	OCT92	Строка	0	OCT 92	
31	-	Строка	0	-	
32	0	Целый	00	0	
33	724	Целый	00	724	
34	-	Строка	0	-	
25	For	Целый	0.0	72	

Рис. 9. Структура типа Компас-3D

На конечном этапе проектирования создается статическая классификация. Изделия распределяются по пакетам в том виде, в котором они должны быть представлены пользователю.

При необходимости, главная модель дополняется динамической классификацией, т. е. задается возможность группировки изделия по различным критериям.

В связи с тем, что КД, разрабатываемая средствами Компас-3D и Лоцман: PLM имеет ассоциативные связи со справочниками HCИ, передача КД на другое предприятие должно сопровождаться передачей актуализируемых копий справочников HCИ. В 2017 году проведены пилотные работы по передаче экземпляров БД электронных справочников на предприятия ЯОК. В настоящее время идет тиражирование актуальных копий справочников на некоторые предприятия ЯОК и также учитываются их запросы на введение данных по их НД.

Передача актуальных БД справочников между предприятиями может происходить двумя способами:

• с использованием файлового ресурса АСЗИ «Единое информационное пространство предприятий ЯОК» (ЕИП ЯОК);

• через защищенный канал связи «Деловая почта» (VipNet).

В ближайшем будущем планируется завершить работы по отраслевому наполнению справочника СИ и приступить к созданию централизованного справочника ЭРИ для схемотехнического проектирования в Altium Designer. При этом будет продолжено текущее наполнение справочников по заявкам подразделений ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и предприятий ЯОК.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАРУШИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ОХРАННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

<u>В. Е. Кононова,</u> В. Н. Дюпин

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

На сегодняшний день системы постоянного наблюдения за процессами, протекающими в окружающей среде (системы мониторинга) являются ключевым звеном в автоматизированных системах (AC) охраны объектов (ОО). АС ОО применяются для реализации систем антитеррора сотрудниками спецслужб (например, реализации системы охраны граждан при проведении чемпионата мира по футболу), а также реализации систем контроля преодоления и пересечения охраняемых зон в интересах частных юридических лиц (например, реализации системы охраны складов магазина).

Объектом исследования данной работы является система мониторинга (СМ) продовольственного магазина. Цель данной работы заключается в повышении автоматизации СМ в части выявления нарушителя и предупреждения противоправных действий нарушителя. Следует учесть, что основной проблемой при проектировании СМ является стохастический, слабо формализованный характер процессов, протекающих в АС ОО.

Для достижения цели данной работы необходимо решить следующий перечень задач:

1) определить объекты защиты и границы контролируемых зон;

2) формализовать модель поведения нарушителя;

3) классифицировать модель поведения;

4) реализовать модель противодействия нарушителю;

5) верифицировать имитационную модель.

Определение объектов защиты и границ контролируемых зон

Охраняемое предприятие можно рассматривать как систему, состоящую из статических и динамических объектов. Статическими объектами являются товары магазина, подлежащие охране. Также к статическим объектам относится инвентарь магазина (стеллажи, кассы, корзины, рекламные плакаты и т. д.). Динамическими объектами являются посетители магазина (покупатели и нарушители) и рабочий персонал магазина (кассиры и охранники).

Задача охраны магазина сводится к предотвращению проноса посетителями магазина товаров мимо касс магазина. Для организации охраны магазина вводятся понятия контролируемых зон магазина, включающих:

- 1) зону входа посетителей в магазин;
- 2) зону покупок;
- 3) зону выхода посетителей из магазина.

Зона входа посетителей в магазин является самой безопасной зоной. В этой зоне покупатели арендуют крупногабаритные корзины для покупок в магазине (габариты корзин подобраны оптимально с точки зрения объемов закупок в магазине и незаметного выноса корзины за территорию магазина). Наличие корзины у покупателя фиксируется охранником магазина как намерение покупателей приобретать товар в магазине.

Зона покупок – зона взаимодействия покупателя с товаром магазина. Зона покупок занимает основную площадь магазина и характеризуется умеренным уровнем угрозы для охраны магазина. В данной зоне охранники осуществляют контроль над поведением покупателей с целью выявления гипотетического нарушителя. Гипотетического нарушителя выделяет несвойственное поведение покупателя, например, беспокойная походка (покупатель постоянно оглядывается по сторонам), пронос товара магазина за подмышкой или в кармане. Следует учесть, что зона покупок может быть поделена на внутренние зоны контроля в зависимости от цены товара, расположенного на внутренних зонах.

Зона выхода покупателя из магазина – зона повышенного контроля системы безопасности магазина. Область пересечения зоны покупок и зоны выхода покупателя из магазина составляют торговые ряды касс магазина. Задача охранника в зоне выхода покупателя из магазина состоит в предотвращении проноса покупателя товара магазина мимо касс магазина.

Формализация модели поведения нарушителя

Математическая модель поведения нарушителя представляет собой формализованное описание сценариев воздействия нарушителя на систему в виде логико-алгоритмической последовательности действий нарушителя, количественных значений, характеризующих результаты действий, и функциональных зависимостей, описывающих протекающие процессы взаимодействия нарушителя с элементами охраняемого объекта и системы охраны [1].

Поскольку человек является сложной, открытой, саморазвивающейся системой, то для формализации

модели его поведения применяют метод имитационного моделирования. Имитационное моделирование – метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему (построенная модель описывает процессы так, как они проходили бы в действительности), с которой проводятся эксперименты, с целью получения информации об этой системе. Модель поведения нарушителя в таком методе исследования называется имитационной моделью.

На первом этапе построения имитационной модели проводится сбор входных данных. Входными данными AC является последовательность изображений (кадров), которые поступают с видеокамер CM через небольшие промежутки времени (видеопоток). Скорость видеопотока определяется отношением количества изображений, поступающих на сенсорную матрицу видеокамеры в единицу времени (от 3 – 30 изображений в секунду). Ниже представлены 2 кадра видеопотока на момент времени съемки первой секунды (рис. 1а) и второй секунды (рис. 1б).

На втором этапе осуществляется анализ соседних кадров видеопотока с целью отделения статической области кадра (области заднего фона) от области динамических объектов (посетителей магазина) кадра. На рис. 2 представлен результат отделения области динамического объекта от заднего плана для кадра рис. 1а (см. рис. 2).

На третьем этапе динамические объекты разбиваются на сегменты. Для получения сегментов у каждого объекта выделяется граница L. Границы объектов делятся на отрезки в соответствии со следующим алгоритмом:

выбирается самая верхняя точка кривой M^T;

2) вычисляется направление нормали n^T в точке M^T;

3) выполняется обход кривой L против часовой стрелке до точки, направление нормали в которой перпендикулярно n^T;

4) выполняется обход кривой L по часовой стрелке с разбиением кривой на отрезки с условием, что направления нормалей на концах отрезков противоположны друг другу;

5) концы получившихся отрезков смыкаются, образуя сегмент объекта.

На четвертом этапе вычисляются центры сегментов динамических объектов, являющиеся характерными точками сегментов.

Поведенческие модели динамических объектов определяются динамикой движения центров сегментов этих объектов на кадрах видеопотока.

Классификация модели поведения

Для реализации задачи классификации в AC ОО были введены эталонные модели поведения покупателей магазина, основанные на открытых наборах данных проекта BML Walker лаборатории «Bio motion», исследующей природу перцептивных представлений. На рисунках ниже представлены 4 фазы движения поведенческих моделей разозленного покупателя (рис. 3) и модели движения настороженного покупателя (рис. 4).





Рис. 2. Результат выделения области динамического объекта

Рис. 1. Кадры видеопотока: а – первая секунда съемки, б – вторая секунда съемки



Рис. 3. Модель движения разозленного покупателя



Рис. 4. Модель движения настороженного покупателя

Анализ движения характерных точек, расположенных на поверхности динамического объекта позволяет выдвигать гипотезы о физической форме исследуемого покупателя, его возрасте, весе, поле, настроении и т. д.

Классификация модели поведения сводится к сопоставлению характерных точек исследуемой модели точкам эталонных моделей. Алгоритм сопоставления точек моделей заключается в поэтапном наложении множества точек исследуемой модели M_0 на множество точек эталонной модели M_i (где i – номер эталонной модели) и вычисления вероятности совпадения моделей P_i . Для вычисления P_i вокруг каждой точки m_k (где k – номер точки исследуемой модели) множества M_0 вводится ε окрестность и вычисляется отношение количества попадания s_i точек множества M_i в ε окрестности точек множества M_0 к общему количеству точек множества M_0 [2].

Реализация модели противодействия нарушителю

Реализация модели противодействия нарушителя правил АС ОО в контексте данной работы сводится к формализации правил взаимодействия между покупателем и охранником и заключается в построении продукционной модели знаний. Продукционные модели — это наиболее распространенные на текущий день модели представления знаний, где знания описываются с помощью правил алгебры логики «если-то» (явление – реакция).

Преимущества применения продукционных моделей заключаются в двух тезисах:

1) оперирование простым и точным механизмом использования знаний, основанным на алгебре исчисления высказываний (Булевой алгебре);

2) представление знаний с высокой однородностью, описываемых по единому синтаксису.

Эти две отличительные черты определили широкое распространение методов представления знаний правилами. Программные средства, оперирующие со знаниями, представленными правилами, получили название продукционных систем (или систем продукции) и впервые были предложены Постом в 1941 году [3].

Общим для систем продукций является то, что они состоят из трех основных элементов:

 набора правил, используемых как база знаний (БЗ), который чаще всего называют базой правил;

 рабочей памяти – области хранящей предпосылки, касающиеся отдельных задач, а также результаты выводов, получаемых на основе этих предпосылок;

 механизма логического вывода, использующего правила в соответствии с содержимым рабочей памяти.

Для демонстрации цепочки рассуждений в продукционной модели в работе представлен пример модели противодействия нарушителю.

Входными предпосылками модели противодействия являются утверждения вида «покупатель оглядывается по сторонам», «покупатель прячет товар за пазуху», «покупатель не взял корзину».

БЗ модели противодействия содержит З правила:

 если покупатель нервничает, и покупатель прячет товар за пазуху, и покупатель не собирается совершать покупки, то покупатель является нарушителем;

 если покупатель оглядывается по сторонам, то покупатель нервничает;

 если покупатель не взял корзину, то покупатель не собирается совершать покупки;

 если покупатель является нарушителем, то покупателя необходимо задержать.

На начальном этапе построения цепочки рассуждения входные предпосылки заносятся в рабочую память. Исходя из содержимого рабочей памяти, подтверждаются второе и третье правила БЗ. Результат подтверждения этих правил заносится в виде суждений «покупатель нервничает» и «покупатель не собирается совершать покупки» в БЗ. Содержимое рабочей памяти подтверждает первое правило БЗ, продуцирующее новое суждение в БЗ «покупатель является нарушителем». Совокупное содержимое рабочей памяти подтверждает четвертое правило БЗ, формирующее заключение «покупателя необходимо задержать». Ниже представлена полная схема продукционной модели (рис. 5).

ток СМ, из которого АС ОО извлекает набор динамических объектов. Требуется разбить исходное



Рис. 5. Продукционная модель противодействия нарушителю

Верификация имитационной модели

Для проверки имитационной модели поведения использовались пять видеофрагментов из материалов мобильных репортеров, посвященных кражам в продуктовых магазинах. При тестировании имитационной модели в трех случаях АС ОО заподозрила посетителя магазина в противоправных действиях.

Заключение

Таким образом, данная работа посвящена разработке имитационной модели нарушителя в системе мониторинга охранного предприятия, основанной на алгоритмах поиска и классификации динамических объектов в видеопотоке СМ, а также алгоритме реакции АС ОО на действия динамических объектов системы в соответствии с правилами продукционной модели. При такой постановке задачи дан видеопомножество объектов на классы поведения, т. е. для каждого объекта найти класс поведения, которому он принадлежит. В результате получения новой информации проводится анализ продукционной модели AC ОО, по итогам которого возможна коррекция существующих правил взаимодействия AC ОО с исследуемыми объектами.

Литература

1. Локтев Д. А. Разработка и исследование методов определения параметров статичных и движущихся объектов в системе мониторинга: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.17. М., 2015.

2. Семенов В. А. Теория вероятностей и математическая статистика. СПб.: Питер, 2013.

3. Спицын В. Г. Представление знаний в информационных системах. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЦЕССНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СЛИЯНИИ / ПОГЛОЩЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

<u>Л. Ф. Кочкина,</u> С. В. Баканов, С. О. Голеусова

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

Введение

В докладе представлен опыт применения методологии процессного управления при реализации проекта «Внедрение ERP-комплекса во ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» на общей с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» информационной базе» (далее – Проект) в части выстраивания процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в соответствии с процессами ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». По итогам Проекта обозначены основные проблемы, возникающие в ходе работ, приведены рекомендации по организации работ, примерные шаблоны форм для сбора и анализа информации.

Общие сведения по Проекту

Проект был реализован в 2017 году в рамках реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Основные цели Проекта:

 – создание единой системы учета в рамках объединенного предприятия и запуск ее в промышленную эксплуатацию с 01 января 2018 года;

 – выработка новой методологии учета на объединенном предприятии с учетом различий в учетной политике, методиках учета затрат и расчета себестоимости, разного уровня автоматизации, изменениях в организационной структуре;

 – формирование начальных данных в нужных аналитических разрезах, объединение нормативносправочной информации двух предприятий;

 обеспечение непрерывности ключевых процессов в процессе объединения;

– обеспечение своевременного расчета заработной платы для работников объединенного предприятия за январь 2018 года и формирования годовой бухгалтерской и налоговой отчетности за 1-й квартал 2018-го года.

Так как подобное объединение предприятий подразумевает объединение информационных систем в Проекте, необходимо, во-первых, запланировать работы по изучению и анализу бизнеспроцессов предприятий на предмет выявления их сходства и различия. Во-вторых, определить, какая из информационных систем предприятий должна использоваться в качестве учетной системы объединенных предприятий. В нашем случае в качестве учетной системы объединенного предприятия была выбрана ERP-система, функционирующая в РФЯЦ-ВНИИЭФ. В-третьих, необходимо создать проектную команду, которая должна взять на себя функции по обеспечению слияния информационных систем, контроля сроков выполнения работ.

Применение методологии процессного управления позволяет установить порядок взаимодействия и определить расхождения в процессах между структурными функциональными подразделениями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и структурными функциональными подразделениями ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Таким образом, анализ процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в рамках Проекта позволил решить следующий ряд задач:

 – определение и согласование распределения функций и ролей в процессах, подлежащих консолидации в рамках Проекта;

 – определение и согласование перечня объектов информации по обмену со сроками их предоставления по консолидируемым процессам при взаимодействии предприятий;

 – определение и согласование совместных решений по взаимодействию организаций в части автоматизации процессов, построения единой ИТ-инфраструктуры;

 – разработка регламентов взаимодействия между предприятиями в рамках консолидируемых процессов.

Разработка плана мероприятий по реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»

Коллективная работа работников ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в рамках процесса анализа деятельности организаций строилась на основе утвержденного плана мероприятий по реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (далее – План мероприятий).

План мероприятий представлял собой систему взаимосвязанных мероприятий, направленных на реализацию целей и задач программы по реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (далее – Программа) и необходимых для достижения ключевых вех Программы, с указанием ответственных за их выполнение, сроков исполнения и ожидаемого результата.

План мероприятий утверждался совместно директорами ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» и включал в себя шесть основных блоков:

подготовительные мероприятия;

организационные мероприятия;

переоформление имущественных прав и разрешительных документов;

 мероприятия в сфере взаимодействия служб ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»;

– мероприятия по организационной структуре и управлению персоналом,

завершающие юридические действия.

Блок «Подготовительные мероприятия» состоял из мероприятий по организации планируемой работы, таких как, например, создание рабочих групп, назначение ответственных, а также мероприятий, касающихся анализа в части имущества и определения статуса ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Блок «Организационные мероприятия» подразумевал включение мероприятий по уведомлению всех заинтересованных лиц о начале процесса реорганизации и внесению в устав ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» изменений, касавшихся ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Блок «Переоформление имущественных прав и разрешительных документов» содержал мероприятия по инвентаризации движимого и недвижимого имущества, результатов интеллектуальной деятельности и по переоформлению лицензий и других разрешительных документов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Блок «Мероприятия в сфере взаимодействия служб ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» включал в себя анализ ключевых процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», подлежащих консолидации, соответствующими структурными функциональными подразделениями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», разработку регламентов и сквозных процессов по взаимодействию между структурными функциональными подразделениями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Блок «Мероприятия по организационной структуре и управлению персоналом» содержал мероприятия по подготовке и утверждению проектов организационной структуры, штатного расписания, системы оплаты труда ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с учетом присоединения ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Так же в данный блок были включены мероприятия по созданию ИАСУ ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» и созданию единого информационного пространства по взаимодействию ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Завершающий блок «Завершающие юридические действия» содержал заключительные мероприятия, такие как оформление прекращения деятельности ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», составление заключительной бухгалтерской отчетности и вступительного баланса после фактического объединения ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», решение вопросов с банками относительно расчетных счетов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» и доведение соответствующей информации до заинтересованных лиц.

Создание организационной структуры проекта по внедрению ИТ-решений, входящих в Комплекс систем «Управление предприятием», в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» на единой информационной базе

В целях эффективной организации и координации работ по Плану мероприятий Программы, в части проекта по внедрению ИТ-решений, входящих в Комплекс систем «Управление предприятием», во ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» на единой информационной базе, были выпущены организационно-распорядительные документы – приказы по обеим организациям: от 04.09.2017 №... «О реализации проекта внедрения ERP-комплекса», от 04.09.2017 №... «О внедрении комплекса ERP в едином информационном пространстве ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Данными приказами была введена организационная структура Проекта, и определены форма и сроки предоставления отчетности по его реализации.

Проект был разбит на под проекты в соответствии с определенными ключевыми процессами, подлежащими консолидации в процессе реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», а также в соответствии с системами, входящими в состав ЕRP-системыи планируемыми к внедрению в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

В приказах были определены следующие основные роли:

 руководители Проекта – по одному работнику от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», имевшему полномочия и компетенции для принятия решений по Проекту в рамках своего предприятия, а также несший ответственность за реализацию Проекта и его результаты;

 руководители под проектов – работники структурных подразделений ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и соответствующих структурных подразделений ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», имевшие соответствующие полномочия и компетенции и осуществлявшие общее руководство работами по подпроектам в рамках своих направлений деятельности и зон ответственности. Руководителями Проекта были назначены заместитель директора ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по информационным технологиям и управлению жизненным циклом изделий – директор департамента О. В. Кривошеев и заместитель директора ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» по информационным технологиям Д. В. Седаков. Руководителями под проектов были назначены работники ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» из числа ответственных, определенных Планом мероприятий, или являвшихся ответственными за реализацию ключевых процессов, то есть руководители структурных функциональных подразделений по ключевым направлениям деятельности.

На основании опыта проведенного Проекта, следует отметить, что подобная организация работ оказалась неудобной и неэффективной. Формирование двух разных команд объединяемых предприятий показало свою несостоятельность. Был сделан вывод, что с целью результативной организации работ по слиянию/поглощению предприятий нужно создавать единую команду по реализации Проекта, выпускать единый приказ по двум предприятиям, в котором были бы обозначены следующие роли:

руководитель Проекта – работник Головной организации, имеющий полномочия и компетенции для принятия решений в рамках Проекта в целом, а также несет ответственность за реализацию Проекта и его результаты в целом;

 заместитель руководителя Проекта – работник Филиала, имеющий полномочия и компетенции для принятия решений в рамках Проекта в части Филиала, а также несет ответственность за реализацию Проекта и его результаты в части Филиала;

 координатор Проекта со стороны Головной организации – работник Головной организации, который организует работу по Проекту, обеспечивает ет взаимодействие участников Проекта, следит за ходом реализации Проекта, принимает меры, направленные на достижение поставленных целей;

 координатор Проекта со стороны Филиала – работник Филиала, который организует работу по Проекту, обеспечивает взаимодействие участников Проекта, следит за ходом реализации Проекта, принимает меры, направленные на достижение поставленных целей;

 руководители подпроектов – работники структурных подразделений Головной организации, имеющие соответствующие полномочия и компетенции и осуществляющие общее руководство работами по подпроектам в рамках своих направлений деятельности и зон ответственности;

 администраторы подпроектов – работники структурных подразделений Филиала, имеющие полномочия и компетенции для управления подпроектами в рамках своих направлений деятельности и зон ответственности и осуществляющие поддержку руководителям подпроектов в части реализации организационных вопросов;

– участники подпроектов (технические специалисты, консультанты, тренеры) – работники структурных подразделений Головной организации и Филиала, включенные в состав организационных структур по соответствующим подпроектам и реализующие задачи в ходе исполнения соответствующих подпроектов согласно определенным для них ролям.

Проведение анализа процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в рамках Проекта

Для проведения, в рамках Проекта анализа деятельности ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» необходимо было организовать и провести предварительную работу на данном предприятии, включающую:

 обучение работников ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» основам процессного подхода к управлению организациями;

 формирование карты процессов верхнего уровня ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (далее – карта ПВУ).

В целях обеспечения необходимого базового уровня теоретических знаний в области процессноориентированного управления и для повышения результативности и эффективности дальнейших работ по анализу деятельности ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», описанию и анализу процессов предприятия для групп слушателей ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в 2013 году в рамках функциональных рамок проекта «Определение и организационного периметра реализации программы тиражирования ТИС ЯОК, подготовка к внедрению процессного подхода в ФГУП «ФНПЦ НИИИС» (далее - Проект по тиражированию) в г. Нижний Новгород были проведены:

1) курс «Основы процессного подхода. Моделирование деятельности предприятия на основе референтной модели» 24 сентября 2013 г., количество обученных – 5 человек, табл. 1;

2) курс однодневного семинара для высшего руководства «Основы процессно-ориентированного управления» 29октября 2013 г., количество обученных – 21 человек, табл. 2;

3) курс обучения для руководителей и ключевых специалистов структурных подразделений по теме «Основы процессно-ориентированного управления» 01–05 ноября 2013 г., количество обученных – 39 человек, табл. 3.

В результате пройденных курсов работники предприятия:

 получили общее представление о процессном подходе как эффективном подходе к управлению предприятием,

Программа учебного курса «Основы процессного подхода. Моделирование деятельности предприятия на основе референтной модели»

Темы занятий	Продолжи- тельность (мин.)
Функции и функциональное управление, процессы и процессный подход	90
Процессный подход как элемент совершенствования и повышения зрелости системы управления, повышения эффективности деятельности предприятия	35
Общие принципы моделирования деятельности, методика описания деятельности	50
Реализация процессного управления в ГК «Росатом». Декомпозиция решений в области процессного управления на предприятия	50
Представление референтной модели предприятий ЯОК	20
Основные тезисы и применяемость референтной модели	15
Моделирование деятельности предприятия на основе референтной модели	30
Проведение проектов с использованием ARIS	40
Практическое применение процессной модели	30

Таблица 2

Программа учебного курса для высшего руководства «Основы процессно-ориентированного управления»

Темы занятий	Продолжи- тельность (мин.)
Часть І. Доклад "Использование процессного подхода к управлению в отраслевых решениях"	45
Применение процессного подхода к управлению научным предприятием	5
Реализация процессного управления в ГК «Росатом». Декомпозиция решений в области процессного управления на предприятия	10
Основные тезисы и применяемость референтной модели	5
Моделирование деятельности предприятия на основе референтной модели	10
Система управления бизнес-процессами	5
Практическое применение процессной модели	10
Часть II. Практика по модели процессов верхнего уровня	45
Представление эталонной отраслевой модели процессов	20
Вопросы и ответы по эталонной модели	15
Определение владельцев процессов	10

Таблица 3

Программа обучения для руководителей и ключевых специалистов структурных подразделений по теме «Основы процессно-ориентированного управления»

Темы занятий	Продолжи- тельность
	(мин.)
Необходимость, история и принципы процессного управления	20
Базовая методология описания деятельности предприятия с использованием процессного подхода	30
Карта процессов верхнего уровня, принципы построения	20
Архитектурный подход для проектирования ИС на базе методологии процессно- ориентированного управления	30
Основы моделирования деятельности предприятия с использованием инструментария ARIS	20
Применение процессного подхода к управлению научным предприятием	10
Реализация процессного управления в ГК «Росатом». Декомпозиция решений в области процесс- ного управления на предприятия	30
Система управления бизнес-процессами	25
Практическое применение процессной модели	40
Представление референтной модели предприятий ЯОК	20
Основные тезисы и применяемость референтной модели	15
Моделирование деятельности предприятия на основе референтной модели	30

 – получили знания о комплексной процессной модели предприятия, как элементе хранения знаний о предприятии и инструменте для решения задач управления и развития предприятия,

 – получили основы знаний по описанию и анализу ключевых процессов предприятия,

 – получили представление о процессе управления предприятием в целом,

 – получили общее представление об информационных технологиях, используемых при управлении предприятием и на уровне рабочего места,

 поняли собственную роль и место в общем процессе управления предприятием, частные функции в процессе, требуемые для исполнения функций знания и навыки работы в информационных системах.

Также, в рамках Проекта по тиражированию была сформирована карта ПВУ ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Она разрабатывалась на основании информации, полученной в результате анализа деятельности предприятия ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», и отражала все процессы, выполняемые на предприятии, сгруппированные по направлениям деятельности (процессным областям).

В результате проведенных работ на предприятии было выделено 64 процесса по шестипроцессным областям:

процессы управления – 4 процесса;

- процессы развития 5 процессов;
- поддерживающие процессы 16 процессов;

- безопасность и контроль - 11 процессов.

процессы основной деятельности – 25 процессов;

 процессы непрофильной деятельности – 3 процесса.

Выделение ключевых процессов для консолидации.

Внедряемая в рамках Проекта ERP-система является частью Комплекса систем «Управление предприятием», который входит в состав СПЖЦ «Цифровое предприятие», представленный на рис. 1.

Система полного жизненного цикла «Цифровое предприятие» (далее – СПЖЦ), разрабатываемая во ВНИИЭФ, – это совокупность отечественных информационных технологий, позволяющих создавать сложные инженерные объекты, на базе которых возможно проектирование, изготовление и поддержка всех стадий жизненного цикла объектов ВВСТ на мировом технологическом уровне. СПЖЦ обеспечивает снижение импортозависимости в части использования ПО организациями ОПК РФ и высокотехнологичными отраслями промышленности.

Комплекс систем «Управление предприятием» представляет собой функционал, изображенный на рис. 2, и обеспечивает эффективность и качество управления ресурсами предприятия, включая:

 научно-производственную базу (оборудование, установки);

 основные средства (здания, сооружения, имущество);



Рис. 1. Состав СПЖЦ «Цифровое предприятие»



Рис. 2. Состав комплекса систем «Управление предприятием»

 трудовые ресурсы (основной и вспомогательный персонал);

нематериальные активы (патенты, изобретения, технологии);

 – финансовые ресурсы (денежные средства, капитал, инвестиции, оборотные средства);

 материальные ресурсы (сырье, материалы, полуфабрикаты, комплектующие).

В состав комплекса систем «Управление предприятием» входят:

 система управления ресурсами предприятия (ERP – система):

- управление деятельностью;

- экономическое управление;
- управление закупками;
- управление снабжением и сбытом;
- управление финансами;
- управление основными средствами и ТОРО;
- бухгалтерский и налоговый учет;
- система управления персоналом;
- управление НСИ;
- управление проектами;
- управление эффективностью деятельности;
- документооборот;
- управление недвижимостью с использованием GIS-технологий;
 - интеграционная платформа;
 - портальные сервисы.

В соответствии с модулями системы ERP, Комплексной процессной моделью ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и сформированной картой ПВУ ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» были выделены следующие ключевые процессы предприятий, подлежащие консолидации:

- управление деятельностью;
- управление договорной деятельностью;
- управление закупками;
- управление снабжением, складом, сбытом;
- учет движения основных средств;
- управление недвижимостью;

управление техническим обслуживанием и ремонтами;

- управление финансами и расчетами;
- управление экономической деятельностью;
- бухгалтерский и налоговый учет;
- управление персоналом.

Разработка формы предоставления данных по распределению функций и ролей в процессах, подлежащих консолидации

Анализ ключевых процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», подлежавших консолидации, соответствующими структурными функциональными подразделениями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» был начат с разработки формы предоставления данных по распределению функций и ролей в процессах. Была разработана форма, основанная на таксономической модели процессов ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», представленная в табл. 4, с краткой инструкцией по заполнению.

Таблица 4

Форма 1. Распределение функций и ролей в консолидированных¹ процессах по направлениям

Предприятия Процессы ²	ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»
«Наименование Процесса верхнего уровня»		
«Наименование Подпроцесса 1.1» (процесса 2-го	уровня)	
«Наименование Процедуры 1.1.1» (процесса 3-го	уровня)	
«Наименование Функции 1.1.1.1»	$(+/-)^3$	(+/-)
«Наименование Функции 1.1.1.2»	(+/-)	(+/-)
«Наименование Функции 1.1.1.N»	(+/-)	(+/-)
«Наименование Подпроцесса 1.2» (процесса 2-го	уровня)	
«Наименование Процедуры 1.2.1» (процесса 3-го	уровня)	
«Наименование Функции 1.2.1.1»	(+/-)	(+/-)
«Наименование Функции 1.2.1.2»	(+/-)	(+/-)
«Наименование Функции 1.2.1.N»	(+/-)	(+/-)

¹ Консолидированные процессы – процессы, определенные для консолидации в процессе слияния/поглощения организаций и указанные в Плане мероприятий

² Процессы – наименования процессов из таксономической процессной модели Головной организации, в случае наличия дополнительных процессов / функций в Филиале следует добавлять их в имеющийся перечень с соответствующей пометкой или с выделением цветом

³ Правило заполнения: «+» – в случае, если функция выполняется в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», «-» – в случае, если функция не выполняется в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»

Порядок заполнения и согласования Формы 1

Заполнение Формы 1 было организовано Руководителями подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по соответствующим направлениям деятельности совместно с администраторами подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Руководители подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по соответствующим направлениям деятельности курировали работу по заполнению Формы 1, как в части ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (столбец 2 «ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»»), так и в части ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (столбец 3 «ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова») в соответствии с руководством по заполнению и направляли ее на согласование соответствующим администраторам подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Администраторы подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» дополняли Форму 1 в части ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (столбец 1 «Процессы»), при необходимости вносили корректировки (столбец 3 «ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»). Отдел процессов деятельности предприятия выполнял роль консолидатора информации, содержащейся в данных формах. Консолидированная информация была направлена в подразделение-разработчик, непосредственно занимающееся развертыванием на базе ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» сегмента служебной вычислительной сети, обеспечивающей полномасштабное внедрение ERPкомплекса.

Использование данных, полученных в результате анализа Формы 1

Информация, содержавшаяся в заполненных и согласованных Формах 1, была использована для решения следующих задач:

 – определение перечня процессов по каждому из направлений, которые подлежали консолидации в рамках единой информационной системы;

 согласование и утверждение распределения ролей в процессах при их консолидации;

– инициация деятельности по актуализации Комплексной процессной модели в части доработки процессов (разделения функций) по факту выявления исполнения разных ролей ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» в рамках выполнения одной функции и в части расширения состава типовых ролей в процессах с учетом выполняемых ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» функций;

 определение перечня процессов, по которым ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» передает информацию в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в электронном виде по установленным шаблонам для консолидации в единой информационной системе;

 проработка механизма взаимодействия (передачи информации) в процессах консолидации; – установление соответствия аналитики (методы передачи данных, формат передачи данных и т. п.) ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по формам обмена данными;

 подготовка предложений по внесению корректировок / дополнений в справочники Головной организации с целью обеспечения возможности формирования достоверной консолидированной информации из единой информационной системы;

– определение перечня полномочий на выполнение отдельных функций, закрепленных доверенностями Директора ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» организации и планируемых к передаче ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» с юридически оформленного момента осуществления слияния / поглощения Головной организацией.

Определение ключевых показателей, документов, отчетности, подлежащей консолидации по консолидируемым процессам

Для определения ключевых показателей, документов, отчетности, подлежащей консолидации по консолидируемым процессам, была разработана форма, в которой в привязке к процессам, подлежащим консолидации, были отражены все данные по обмену между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», включая бумажные и электронные объекты информации, с указанием срока их предоставления. В табл. 5 представлен предлагаемый вариант такой формы – Форма 2.

Порядок заполнения и согласования Формы 2

Заполнение Формы 2 было организовано Руководителями подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по соответствующим направлениям деятельности совместно с администраторами подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Руководители подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по соответствующим направлениям деятельности курировали работу по заполнению Формы 2, как в части ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (столбец 1 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), так и в части ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (столбец 2 ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова») в соответствии с руководством по заполнению и направляли ее на согласование соответствующим администраторам подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Администраторы подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» при необходимости дополняли или вносили корректировки в Форму 2 в части Филиала (столбец 2 ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»», строки «Процесс 2-го уровня ...», «Процесс взаимодействия ...», «Функция ...», строки, содержащие информацию о данных по обмену и сроках их предоставления).

Форма 2. Документы, данные по обмену и сроки их предоставления по процессам взаимодействия ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»

Φ	ГУП «РФЯЦ-ВНИ	ИЭФ»	ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»					
Документы по обмену	Данные по обмену ¹	Срок предоставления информации	Документы по обмену	Данные по обмену ¹	Срок предоставления информации			
Пр	оцесс верхнего урс	вня N1	Процесс верхнего уровня М1					
«Наименова	ние Процесса верхи	него уровня N1» ²	«Наименование Процесса верхнего уровня М1» ²					
П]	роцесс 2-го уровня	N1.1 ³	Процесс 2-го уровня М1.1 ⁴					
«Наим	ренование Подпроц	ecca N1.1»	«Наименование Подпроцесса М1.1»					
Проп	есс взаимодействи	я N1.1.1 ³	Процесс взаимодействия М1.1.1 ⁴					
«Наименова	ание Процесса 3-го	9 уровня N1.1.1»	«Наименование Процесса 3-го уровня М1.1.1»					
«Наименова	Функция ⁵ N1.1.1.	1 ³	Функция ⁵ М1.1.1.1 ⁴					
	ние Процесса 4-го	уровня N1.1.1.1»	«Наименование Процесса 4-го уровня М1.1.1.1»					
✓	✓	✓	✓	✓	✓			
✓	✓	✓	✓	✓	✓			
Про «Наименова	рцесс верхнего урог ние Процесса верх	 вня NN ² него уровня NN»	 Процесс верхнего уровня MM ² «Наименование Процесса верхнего уровня MM»					
П _І	ооцесс 2-го уровня	NN.1 ³	Процесс 2-го уровня ММ.1 ⁴					
«Наим	енование Подпроц	ecca NN.1»	«Наименование Подпроцесса ММ.1»					
Проц	есс взаимодействи	я NN.1.1 ³	Процесс взаимодействия ММ.1.1 ⁴					
«Наименова	иние Процесса 3-го	уровня NN.1.1»	«Наименование Процесса 3-го уровня ММ.1.1»					
«Наименова	Функция ⁵ NN.1.1 ние Процесса 4-го	1 ³ уровня NN.1.1.1»	«Наименова	Функция⁵ММ.1 ние Процесса 4-го	.1 ⁴ уровня ММ.1.1.1»			
✓ …	✓ …	✓	✓ …	✓ …	✓			
✓ …	✓ …	✓	✓ …	✓ …	✓			

¹ Данные, не вошедшие в раздел «Документы по обмену» (например, электронные данные, которые будут передаваться с помощью модулей ERP-комплекса)

² Названия процессов верхнего уровня для ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» должны совпадать ³ Процессы из таксономической процессной модели ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

⁴ Процессы из таксономической процессной модели ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», в случае наличия дополнительных процессов / функций, следует добавлять их с соответствующей пометкой или с выделением цветом

⁵ Указание функции является уточняющим и не обязательно

Заполненные формы 1, 2 по подпроектам были согласованы письмом со стороны ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Опыт реализации Проекта показал, что согласование Форм 1,2 по каждому из направлений было бы результативнее закреплять решением протокола совместного совещания с участием руководителей подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и администраторов подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

Разработка регламентов взаимодействия между организациями в рамках консолидируемых процессов

В целях формирования единых правил и требований к взаимодействию организационных структур и исполнителей в рамках выделенных консолидируемых процессов были разработаны регламенты взаимодействия между предприятиями (далее по тексту – Регламенты). Основное предназначение Регламентов – определение правил взаимодействия и распределение ответственности и полномочий исполнителей соответственно для каждого из выделенных консолидируемых процессов.

Основой для разработки Регламентов по каждому из консолидируемых процессов являлись заполненные и утвержденные Формы 2.

Работа по разработке регламентов была организована и проведена руководителями подпроектов от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по соответствующим направлениям деятельности на основе шаблона, сформированного отделом процессов деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ. Проекты регламентов направлялись на согласование соответствующим администраторам подпроектов от ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». Регламенты были утверждены двухсторонне: руководителями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и администраторами филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» по соответствующим направлениям.

Заключение

В результате реализации Проекта в 2017 году в течение ограниченного временного периода –

8 месяцев был осуществлен переход предприятия ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» на информационную систему ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В ходе работ по Проекту было выполнено объединение информационных баз двух предприятий с общей численностью более 20 тысяч работников с различиями в системах учета, оплаты труда в условиях реорганизации. В единую информационную систему были объединены многие департаменты и службы предприятия – бухгалтерия, служба управления персоналом в части кадров и заработной платы, планово-экономические структуры, финансовый отдел, структура по закупкам и снабжению, служба под руководством главного инженера в части технического обслуживания и ремонта оборудования

Работа по Проекту велась на основе утвержденного плана мероприятий по реорганизации ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в форме присоединения к нему ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова». В ходе Проекта на основании анализа процессов ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» были выделены ключевые процессы, подлежащие консолидации в процессе перехода на единое ИТ-решение – информационную систему ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», организована и скоординирована работа по взаимодействию предприятий в рамках данных процессов с целью определения данных по распределению функций и ролей в процессах, ключевых показателей, документов, отчетности, подлежащей консолидации по консолидируемым процессам.

Для формирования единых правил и требований к взаимодействию исполнителей, определения их ролей и мест в рамках выделенных консолидируемых процессов были разработаны регламенты взаимодействия между предприятиями. По результатам проекта в целях дальнейшего использования данного опыта по слиянию/поглощению предприятий были разработаны и выпущены соответствующие методические указания.

ПОДГОТОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В ИНТЕГРАТОРЕ ЛОГОС МИП

<u>О. Ю. Кочкина</u>, А. Г. Надуев, А. Д. Черевань, Д. А. Кожаев, Е. Б. Киселева

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

Оптимизация позволяет снизить затраты на изготовление продуктов, повысить эксплуатационные и качественные характеристики изделия. В связи с высокой сложностью расчетов, оптимизация требует больших затрат времени. Таким образом, возникает потребность в разработках качественных отечественных программных продуктов, позволяющих решать такие задачи.

Модульная интеграционная платформа (МИП), входящая в состав пакета программ ЛОГОС, используется для ряда задач, в том числе для подготовки и решения задач оптимизации.

В состав модульной интеграционной платформы входит Интегратор, который предоставляет графический интерфейс пользователя и выполняет функцию связующей программы, позволяя взаимодействовать в единой логически связанной цепочке всем необходимым модулям, позволяющим подготавливать и решать задачи геометрической и параметрической оптимизации изделий.

В качестве отдельных модулей при подготовке и решении задачи оптимизации выступают:

 – система автоматизированного проектирования (САПР);

- препроцессор;
- постпроцессор;
- оптимизатор.

С помощью САПР и препроцессора задаются геометрические и параметрические параметры оптимизации. Интегратор формирует условия оптимизационной задачи и инициализирует ими оптимизатор.

После подготовки задачи, Интегратор запускает ее на расчет на Супер-ЭВМ и отслеживает статус запущенной задачи. По окончанию расчета, на основе полученных результатов, Интегратор представляет результаты оптимизационной задачи в виде таблицы и графика и выделяет оптимальное решение.

Общая схема организации взаимодействия функциональных блоков

Общая схема организации взаимодействия функциональных блоков в процессе решения оптимизационной задачи приведена на рис. 1.

Цикл подготовки и решения задачи оптимизации в Интеграторе МИП Логос.

В качестве образца подготовки задачи в Интеграторе была исследована задача геометрической оптимизации модели сечения механизированного крыла с возможностью изменения шести параметров, характеризующих расположение двух элеронов.



Рис. 1. Взаимодействие функциональных блоков при решении задачи оптимизации

Геометрия расчетной модели представлена на рис. 2.



Рис. 2. Геометрия расчетной модели

Для расчета задачи – геометрическая оптимизация модели сечения механизированного крыла варьируются координаты X₁, Y₁, X₃, Y₃, и углы наклона элеронов a₁, a₃. Максимальные и минимальные значения параметров представлены в таблице. Координаты указаны в метрах, углы наклона в градусах.

Варьируемые параметры модели

Параметры	Минимальное значение	Максимальное значение
X ₁	-10,0	-6,5
Y ₁	-1,5	0,0
a ₁	-10,0	0
X ₃	7,25	10,0
$Y_1 Y_3$	-1,5	0,0
a ₃	0,0	10,0

По результатам оптимизации необходимо найти коэффициент максимальной подъемной силы. Он должен находиться в диапазоне 0,4 – 0,5.

Сценарий проведения запуска задачи заключается в следующем:

Главное окно графической оболочки программы имеет вид, представленный на рис. 3.



Рис. 3. Интерфейс Интегратора

Для корректного взаимодействия модулей в Интеграторе необходимо пользователю произвести настройку, рис. 4.

CAP Knownersen treu delate CAP Known CAP Know	indd Jog Jut (py jennop usro) usro) usro) sel synd yank op-Gent José - 5.1.178m 000 Colocit/projects Colocit/projects
envillo envillo mpiType nodes 1	MPE_LIBHITWORK 1.2;PATH=./;\$PATH;LD_LIBRARY_PATH=.;home/COMMON/integrator;\$LD_LT rpl 1
partition fa	as
Time int	900
user D	Dier none
Hactpoikus coeguneensis c Scientific View schConnector El archive	
TT FROM	
-host 1	172.XX.XX.X
password p	password
User	name
. скраничених оплиноватора	
Depart (Thruburg company)	100
- наконнальное врема работы САD 11	100
накональное время работы САЕ 1	100
накональное вреня работы оптинизатора 3	100
максимальное время работы SV 1	100

Рис. 4. Настройка Интегратора

В главном окне Интегратора создается проект задачи с соответствующим названием «Эллипсы». Для задачи с геометрической оптимизацией необходимо импортировать готовую САD модель, на рис. 5 представлено дерево проекта с созданной задачей для оптимизации.



Рис. 5. Дерево проекта с созданной задачей

Для настройки параметров необходимо запустить в Интеграторе приложение КОМПАС. Пользователь сохраняет начальные значения изменяемых внешних переменных в формате Интегратора. После закрытия приложения в Интеграторе появляется окно новой САD модели, представленное на рис. 6.

Ellinse mm.st	пементы:	 	
	P		

Рис. 6. Выбор *.stp файла

После добавления обнаруженной модели, пользователю предлагается ввести название, рис. 7.

🔣 Создание нового объекта		×
Введите новый объект		
Геометрия		
САД модель	ОК	Cancel

Рис.7. Добавление CAD модели для расчетов

Далее в Интеграторе запускается САЕ, рис. 8. При запуске расчетной модели открывается оболочка ЛОГОС-ПреПост, где пользователь отмечает границы для оптимизации параметров в Интеграторе.

Проект	Модель	Задачи	Инструме	нты Помощь		
	Fi G		🛄 🗘) 🗅 🛛 🗷	× 🔀 🔵	
Обозрева	атель прое	кта		₽×	Обозреватель заданий	і Резу
) Эллипсы - 😪 Конс - Ц. 🐻	трукторск еометрия	кая модель	ллемент: САD м апустить САD апустить САE апустить СAE сопировать сопировать сопировать сопировать сопировать сопировать	одель 'Геометрия' [2]	
			В	ид:	•	

Рис. 8. Запуск САЕ в Интеграторе

После настройки параметров в ЛОГОС-ПреПостмодель необходимо сохранить в Интеграторе и запустить функцию настройки оптимизационной задачи, рис. 9.

🖻 🛅 Эллипсы	
🖻 🍓 Конструкторская модель	
🖨 📾 Геометрия	
😑 🌄 Расчетная модель	1
🖳 😹 Целевые функции	📃 Элемент: САЕ модель 'Расчетная модель' [3]
В параметры	
	📃 Запустить САЕ
	🗅 Копировать
	🗅 Клонировать
	餐 Создать оптимизационную задачу
	🔀 Создать задачу параметрических исследований
	🗐 Переименовать
	😑 Удалить
	Вид:

Рис. 9. Запуск создания оптимизационной задачи в Интеграторе

В Интеграторе пользователь выбирает параметры для оптимизации, рис. 10.

🖓 паранетры		Параметр	Значение	Mn	Max	-
	R	AI	-10	+10.0	0.0	
	P	A3	10	0.0	10.0	
	P	XI	-6.5	-10.0	-6.50	-
		Паранятр	Значение	Min	Max	-

Рис. 10. Интерфейс задания параметров оптимизации

На вкладке «Целевые функции» задается параметр, который будет оптимизироваться в процессе счета задачи, рис. 11.

	Паранетр	Тип фулкция	Минин	Ограничения	Максинун	Доп. значение	Название значения	-
Г	Fxa		0.0		0.0	0.0	Утол атаки, градусы	
Г	Fyo		0.0		0.0	0.0	Угол атаки, градусы	
P	к	Маконня	0.0		0.0	S.0	Утол атаки, градусы	
Г	Forces TVD: <58ex nons>	1	0.0		0.0			
Г	free_Поток нипульса по оси X		0.0		0.0			
Г	free_Поток инпульса по оси У		0.0	•	0.0			
Г	free_Поток инпульса по оси Z		0.0		0.0			-
Г	free_Поток энтальные		0.0	•	0.0			
Г	free_Parxing Haccua		0.0	•	0.0			
-			1	. 18				- 2

Рис. 11. Интерфейс «целевых функций»

На вкладке «Настройка удаленного пользователя», параметры определяются пользователем, исходя из типа и условий задачи и / или методики, а также с учетом используемого планировщика заданий на удаленной машине, рис. 12.

Паранетры оптинтацият	Целевые функции Настройон удаленного запуска Спранячения	
Пользователь:	User name	
Pasaen:	90200	
Ten MPI:	Impi	
Узлы:	[<u></u>	
Процессы:	1 =	
Ограничение по времения	36000	

Рис. 12. Интерфейс «настройка удалённого пользователя»

В Интеграторе для корректного взаимодействия с внешними модулями задаются ограничения по времени и количеству шагов счета, при достижении которых Интегратор прекращает свою работу, рис. 13.

integrator		
Паранетры оптинскации Целевые фонсции Мастро	йни удалевного запуска Ограничения	
Criptownersen no oppressen CA/IP, man.:	180	
Orpaveneren no eperanei ITVI, eses.:	100	
Promotore no openene Scientific View, mas.:	180	
Traverseren no operater ontrevolatopa, rest.1	180	
Биджет оптинизатора:	72	
Пенит сталнации оптиниватора:	180	
		Carcel CA

Рис. 13. Интерфейс «ограничения»

На вкладке «Обозреватель заданий» главного интерфейса в режиме реального времени отображается ход оптимизационных расчетов (стадия, на которой находится расчет), рис. 14.

A Party States - States - Chromotopy - Dennes								
CALINED ON THREE								
Requirer and operation		Chapman	th land	Reusers	rte	Прафия:	Tubinga.	
ID 1 Steres	-							
TO CONTRACTORIZATION AND AND A DESCRIPTION AND A	101							
In the factors manh								
the United Bridger								
D Contraction of the local division of the l								
07 100 10W 1	- 10					1000		
and a second sec						100		
Points for parlets 11			-		_			-
711		6	774	-			_	
0 M Lor 2			<u =<="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></u>					
California and a second s	-							
Thread and a second to be						DD		
112								
÷ 🖬 (pr 3			-	-		Pre Post		
Tepertipremakinese (per 13				_				
Sa Passe 11						and the second		
TER TER						02:59:35		
0 - Cal 124 - 4								
fispectspoie-vale researching 2.4								
Saates 1.4								
71.4								
II G Lar 1		-				-		
Sectore and the sectore and the sectore sectore and the sectore and the sectore sectore and the sectore sectore and the sectore sector		TALF-R	Change	rhevaltä	Ownerstation	Pandotenterleinote		
Sal 34494 15		148+676	UNKNOWN.					
114		74474675	KING N	42.12.007 (9.07.33	62.43.2947 (6-07-05	00.0040		
0 📾 tar t		Dans 74	10000230	10.13.2017 25.03.40	10.11.201710-04.40	303034		
Teper Termine I many type 1 6		344246 713	COMPLETES	102-13-2017 25-00115	62.10.201716.00.20	30.00.04		
Sa Dates 10		Tagares 7.2	COMMENTS	10.11.01714-06.01	62.12.2017 14:57:17	00.00-54		
718		Takens 7.1	COMPLETED.	10.12.2017 14:52-40	\$2.12.2017 (A-T)-40	30.0039		
+ G are 7		1449-49.5	CONTRACTOR OF	10.02.017 14-00.04	12.12.201714-40.20	100.00.00		
Sa fagacitpaterest incomipes 1.7		Taxan C.S.		10.12 (No? 14 (4 (1)	at all start us all its	10.01.01		
Tagene 1.7		Taxan to 1		40 x1 20x7 x4 40.79		10000		
Peters for persons LT				the shine has also		10.00 KJ		
P G pert		interes .	-	10.11.0017.14.17.08				
Pagas hpromise recent (see 1.0		Darest?		2.12.207 14.212	02.12.2017 (A.34.14	0.019		
Same 1.0		3489-813	CONTRACTOR	10.12.2017 14.24.34	NL 52 2017 (+ 30-17	90-90-43		
Peterle for parlette 1.8		Japa 16	COMPLETED	02.12.2017 (+.0+.04	42.12.2017 14.25.19	80.01.05		
P G Lavit		344415	1.00012722	10.12.2017 14:19:20	42.13.201714.2019	30.00.50		
Contraction of the Contraction o		2444934	0.00012102	12.12.207 14:15:11	62.12.2017 14.16.18	90.01.03		
The second		Courses With	COMPLETED.	42.12.2017 14-10-49	42-12 201714-11:51	00.01.02		
Tearre 1/9		1.000						
Teaminary participants (18		Jane 17	COMPLETED	62.12.2017 (+-06.40	12.12.2017 14-07.16	00.00 N		
Delave 1/9 Percentar parameter 1/8		3449-057 3449-051	COMPLETED	42.42.2517 (+46.4) 42.42.2517 (+42.5)	12.12.2017 14:07 14 02.12.2017 14:03 42	00.00.10 00.00.10		

Рис. 14. Главное окно Интегратора в процессе расчета задачи

После запуска оптимизационной задачи начинается оптимизационный цикл:

 последовательно обрабатываются наборы параметров оптимизации, и вариант расчетной задачи ставится в очередь исполнения; поставленная в очередь исполнения задача оптимизации рассчитывается, сохраняя набор искомых параметров интегральных величин (Y) каждая в свой выходной файл;

 – параметрическая оптимизация задачи осуществляется до тех пор, пока не будут обработаны все наборы, исходя из условий задачи.

На вкладке «График» рис. 15, отображаются итоговые результаты оптимизационных расчетов.



Рис. 15. График результатов расчёта оптимизационной задачи

В результате испытаний Интегратор выбрал оптимальный расчет, при котором коэффициент подъемной силы К максимальный, и выделил его синим цветом. Его значение входит в диапазон 0,4 – 0,5, рис. 16.

	non-ra	# ×.	Clinip	eneries a	. Ivente	1	Petin	anni -	1	Tanger.	Talivisi	1
_	Sa Departipoleada recentore E.e	-	17.4	AI	AT	21	11	n	17		 	_
	Tanasa II.e		1.04 10	-0.04235	3.04226	-7.06227	9.62575	-0.0329675	-0.00521966	0.461818		
	T and		124 11	0.30051	3.34131	17.01652	\$ 38221	40.0413834	-E-0750412	0.47(58)		
	10- Ge Low 11		100 56	-6.971276	5.8724	-7.31907	8,40603	-0.023603	-0.000x52	0.45574		
	Перестронных гизнитрия 8:5		1000	1.00025	431573	7.29322	9.27474	0.0840005	-6.6738212	0.448213		
	The Designed Bits		low to	1.70778	4.3174	17.24738	1.336.00	-0.103416	-0.0323283	0.440758		
	705		Lay 15	-0.04128	4,24221	-7.12838	9.66627	-0.0HUELE	-0.0117064	0.409119		
	10- 🔛 Liber 52		100 54	4.71715	3.76227	.7.21048	9.6852	0.0003945	-0.00+50+53	0.450482		
	Tepergoseas remetare 2.0		100 12	-0.45524	3.37563	-7.672%	9.44188	-0.0117400	-0.048+011	0.408147		
	Percentar servers list.		1000 22	1.38141	3.11785	17.1412	9.58647	-0.040713	-0.0195914	0.460000		
	78.6		line to		3.84063	.7.10176	9 45 500	-0.158331	-0.107104	0.647297		
	5 📾 Lav 53		100 10	4.773234	5.17336	7.1165	0.55781	0.17640	0.0156473	0.450018		
	The Performance Consections in 1		1.00		1.478571			-		C atimina		
	Personanter paranta Int		1.00	A BARDA	a state		in manual	-0.0003054	- A CARDINE	0.453455		
	- v 9:1		line of		4 10175		-	- OTTOERS	A THERE	C attract		
	11- Ins Law 54		1.1	-	4.100 mg	A chiefe						
	Paper Toper tope tope tope 1 x 2		100	0.00018	S. 53407	11.42025	0.01403	-processive:		0.445287		
	Perynutat paciena 9/2		104.67	1.000,00	2.81.967	-1.946.12	9.24020	0.0090003	-0.0027413	0.400903		
	249 192			4.47879	2.72%2	-7.00000	4.42404	0.110205	10.000	C. PELICE		
	TH Cas LOW TR		1007-43	-5.990409	4.546	-7.2005	8.40542	40.012875	-0.0570625	0.454643		
	Leber Doeway Laberthee 411		Can et	-1.1670	4.13344	-7.29649	9.53667	4.137982	-0.111957	0.440628		
	Persynantist pacients (H3)		(Diff. +1	-1.2403	4.85113	-7.3832	* MITE	-0.0408158	-0.03334	G.449104		
	CAT CAT		10er 43	-2.19113	3.59904	1.35385	9.27169	-0.090712+	-0.0525304	0.449553		
	UP The Liber 56		1234 25	1.3695	4.63002	-7.43276	8.00306	-0.0032547	-0.227766	0.446702		
	C Dagson B.4		Lity 38	-2.29063	5.12038	-7,29853	6.87252	-0.1258	-0.221249	0.44549		
	Petrosital paciens bit		104.31	-5.9618	2,8187	-7.3906	8.12145	9.0606340	-0.00227438	0.446808		
	And York		Lise M	4.2728	4.82871	-7.19066	9,52170	-0.0968012	-0.0215018	0.455248		
	The second secon		tay 21	-1.99793	2.25252	17.16829	9.07932	0.117963	-0.0017638	0.449587		
	The Designed D.S.		tite 24	4.2811	4.0451	-7.40429	8.420(9	-0.167479	-0.0912747	0.4373333		
	Preynatur paciena htt	1.0	Line 33	-0.30729	5.72663	-7.5359)	6.59952	-0.130256	-0.317346	0.##6002		
	an 795		104 22	4.72248	6.57011	17.4068	6.5228	0.0670762	-6.341795	0.04722		
	Contraction of the local division of the loc		124 21	-6.92703	3.45233	-7.43877	\$57172	4.020813	-0.0%2748	0.444738		
	Tagene Trd		line 35	4.54(8)	3.31726	-7.30848	9.06252	0.0755323	40.0007224	0.452793		
	Ferynutar pacients Init.		149 25	-5.87236	5.00726	1.20704	9.36121	-0.0754704	-0.05+0383	0.451957		
	and Vink	- 11	10er 28	-1.30445	6.4276	-7.34413	8.42927	-0.171268	-6.330963	0.445292		
	Caper Tracements (event types 10:1	-	100 27	1.79292	5.48334	17.54587	0.3096	-0.100590	-0.122911	0.+42758		
	Taxana 2013		10er 25	-0.0746	5.66621	-7.30967	0.53847	-0.0408475	-0.177323	0.452772		
	Pergranter pacients 20.5		Line 28	-1.58872	4.06111	7.43183	8.43283	0.0293207	-0.127621	0.44829		
			104.14	4.3523	4.77396	-7.36862	9.52657	-0.0758309	-0.137942	0.000042		
	Chiper Turcewalk (How Tarte 15-2		100 22	4.42797	3.03748	17.54778	9.4.7645	011227	-0.121488	0.445471		

Рис. 16. Результаты оптимизационных исследований

Заключение

В данной работе был описан процесс подготовки и решения задач оптимизации в Интеграторе модульной интеграционной платформы Логос. В результате подготовки задачи в Интеграторе были продемонстрированы следующие возможности:

 вычисление новых значений оптимизационных параметров по истории предыдущих шагов;

 – управление процессом оптимизации параметров расчетной модели;

 взаимодействие с системой управления расчетами на супер-ЭВМ;

 взаимодействие базового графического интерфейса с конструкторскими, расчётными моделями, результатами расчетов.

Литература

Мазеин П. Г., Шаламов А.В. Сквозное автоматизированное проектирование в CAD/CAM системах: Учебное пособие.- Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПТРОНОВ

Ю. А. Анисимов, Е. В. Буренкова, <u>В. А. Левцова</u>, М. К. Смирнов

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

Развитие атомной промышленности и все большее распространение различных техногенных источников ионизирующих излучений (ИИ) требует особого внимания к проблемам влияния ИИ на компоненты и узлы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Доклад посвящен исследованию влияния ИИ на оптроны типов 249КП18Т и 249КП19Т. Актуальность данной работы обусловлена тем, что данные оптроны широко используются в РЭА особого назначения и являются сложными устройствами, которые изготавливаются по гибридным технологиям. Они содержат различного рода полупроводниковые материалы, диэлектрические материалы, а из металлов выполняются корпусные конструкции и контакты. Поэтому реакция оптронов на воздействие ИИ носит более сложный характер, чем реакция отдельных, содержащихся в них материалов и конструктивных элементов.

249КП18Т – интегральные микросборки полупроводниковых твердотельных нормально разомкнутых двухканальных полупроводниковых коммутаторов сигналов с гальванической оптоэлектронной развязкой. Они предназначены для использования в устройствах коммутации и системах передачи данных аппаратуры специального назначения,

249КП19Т – микросборки, предназначенные для использования в качестве четырехканального полупроводникового коммутатора с гальванической оптоэлектронной развязкой. Они выпускаются по гибридной технологии, состоят из четырех идентичных каналов, включающих в каждом канале кристалл входного излучающего ИК-диода.

ИК-диод гальванически изолирован иммерсионной средой от кристалла фотоприемной диодной матрицы, подключенной к затворам выходных ключевых МДП-транзисторов, совмещенных в едином кристалле с фотоприемной диодной матрицей на структуре типа КСДИ.

В соответствии с ТУ на данные микросборки, стойкость к воздействию ИИ по характеристике 7И₁ составляет 2У_с. Радиационно-критическим параметром является ток утечки выходного транзистора I_{VT}.

Рассмотрим основные физические эффекты, возникающие при взаимодействии ИИ с веществом, которые требуется учитывать в процессе разработки радиационно-стойкой РЭА. К ним относятся смещение атомов из узлов кристаллической решетки (дефекты смещения) и генерация электронно-дырочных пар (ионизация). В общем случае частицы, проходя через вещество, отдают свою энергию на ионизацию

и на смещение атомов. Если частица передала веществу довольно значительную энергию, то возможно образование целой области разупорядочения, или кластера дефектов. Этот процесс наиболее вероятен при воздействии тяжелых частиц (протонов, нейтронов) с достаточно высокой энергией (согласно стандарту, например, количество дефектов, возникающих от частиц с энергией менее 100 кэВ, считается незначительным). В процессе накопления подобных дефектов сначала происходит деградация параметров и характеристик как отдельных ЭРИ, так и РЭА в целом. Потом возникают катастрофические отказы отдельных, наиболее чувствительных ЭРИ. На этих этапах еще возможно общее сохранение работоспособности РЭА, если вышеперечисленные моменты были учтены при ее конструировании, что будет рассмотрено ниже. Дальнейшее облучение приводит к лавинному нарастанию количества отказов ЭРИ, полной потери функционирования РЭА, а, начиная с некоторых уровней, и к разрушению конструкционных материалов.

При взаимодействии легких частиц (электронов и квантов электро-магнитного излучения) с веществом обычно происходит процесс ионизации. Особенность данного процесса заключается в том, что в полупроводниках, например, ионизация возможна уже при энергиях порядка 0,1 эВ, что соответствует ближнему ИК-диапазону, который используется в оптронах для передачи сигналов. А основное отличие высокоэнергетических частиц заключается в их повышенной проникающей способности.

Процесс ионизации приводит к накоплению объемного заряда. Это, при незначительных уровнях облученности, может вызвать временную потерю работоспособности (ВПР) включенной РЭА. При этом, через некоторое время после воздействия работоспособность РЭА восстанавливается. Необходимо учитывать, что ВПР РЭА, как правило, существенно превышает ВПР отдельных ЭРИ.

При значительных уровнях облученности деградация параметров и характеристик, приводящая к катастрофическим отказам, объясняется в основном нарушением изолирующих свойств материалов. Основным эффектом, приводящим к деградации характеристики МДП транзисторов, является накопление объемного заряда в подзатворном диэлектрике и изменение зарядового состояния его поверхности.

При необходимости оценки граничных значений радиационно-критических параметров полевых транзисторов, процедура испытаний должна содержать: измерение зависимостей радиационнокритических параметров от режима до и после облучения,

 – регистрацию временных зависимостей отжига параметров после облучения (если эти зависимости существенны),

 – поиск корреляционных связей между деградацией параметров и исходными гарантируемыми ТУ значениями параметров,

 – оценку граничного значения радиационнокритического параметра с учетом электрического режима, времени и худших по ТУ исходных значений параметров.

В связи с тем, что разрабатываемая нашим подразделением аппаратура должна быть прочной к воздействию спецфакторов, испытания оптроны проходили именно на прочность, т. е. облучались в пассивном режиме.

Испытания микросборок на прочность к воздействию гамма-нейтронного излучения проводились на моделирующей установке (МУ) при уровне воздействия 2*2Ус по характеристике 7И₁, что лишь вдвое превышает указанное в ТУ значение.

Измерения тока утечки до и после испытаний проводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Основные сведения представлены в табл. 1.



Рис. 1. Структурная схема измерения тока утечки І_{ут} оптрона

Таблица 1

Основные сведения для структурной схема измерения тока утечки I_{vт} оптрона

Позиционное обозначение	Наименование	Количество
DA1	Исследуемое ЭРИ	1
PV2, PV2	Вольтметр	2
G2	Источник питания	1
R2	Ограничительный резистор	1

На выходе источника питания выставляется величина напряжения коммутации согласно ТУ, контролируется по показаниям прибора PV2. Относительно показаний прибора PV1 рассчитывается величина тока утечки по закону Ома.

Проведем анализ полученных результатов.

Испытаниям подвергались выборки из 4 штук каждого типа микросборок. Согласно ТУ І_{ут.} до воздействия ИИ не должен превышать значение 1 мкА, после воздействия 10 мкА у 249КП18Т и 20 мкА у 249КП19Т. Результаты измерений представлены в табл. 2 и табл. 3.

T	aб:	ΠИ	ца	2
---	-----	----	----	---

Результаты измерений I_{ут.} 249КП18Т

№ образца	№ канала	І _{ут.} , нА до воздействия	I _{ут.} , мкА после воздействия
1	Ι	39,24	68,9
1	II	21,62	737
2	Ι	325,43	333,3
2	II	385,49	1871
2	Ι	16,19	688,6
5	II	23,09	3356
4	Ι	635,50	858,3
4	II	628,12	3688

Таблица 3

Результаты измерений I_{vr.} оптронов 249КП19Т

№ образца	№ канала	І _{ут.} , нА до воздействия	I _{ут.} , мкА после воздействия
	Ι	0,36	241
1	II	0,21	246
1	III	0,36	229
	IV	0,26	240
	Ι	0,23	204
2	II	0,21	190
2	III	0,21	192
	IV	0,21	204
	Ι	0,33	199
2	II	0,16	183
5	III	0,8	201
	IV	0,56	175
	Ι	0,23	205
4	II	0,44	200
4	III	0,15	190
	IV	0,4	209

Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической статистики. Подобная обработка проводится в несколько этапов. На первом этапе необходимо избавиться от различных ошибок, возникающих в процессе измерений. Для этого проводится анализ причин возникновения систематических ошибок, и определяются способы их устранения. Затем методом исключения устраняются грубые и случайные ошибки. На втором этапе выдвигаются статистические гипотезы (предположения, касающиеся распределения случайных величин, в данном случае, параметров оптронов) и осуществляется их проверка с помощью статистических критериев (решающих правил, обеспечивающих принятие или непринятие гипотезы). Обычно в процессе проверки используются несколько критериев: Стьюдента, Фишера и другие параметрические критерии,

т. к. они считаются несколько более мощными, чем непараметрические. В процессе обработки результатов эксперимента была подтверждена гипотеза о нормальности распределения параметров оптронов. Учитывая закон распределения, были рассчитаны следующие параметры, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Параметры оптронов до и после воздействия ИИ

	До воздей	іствия ИИ	После возд	ействия ИИ
	I _{yr.cp.} , A	σ	I _{yr.cp.} , A	σ
249КП18Т	$25,9.10^{-8}$	$23,4.10^{-8}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$	11,41.10-4
249КП19Т	$3,2\cdot 10^{-10}$	$1,26 \cdot 10^{-10}$	0,207	0,0164

Действительно, величины тока утечки до воздействия ИИ не превышают указанных в ТУ значений, но после воздействия излучения I_{ут.} оптронов превысили указанные в ТУ значения в среднем в 150 раз у 249КП18Т и, более чем в 10⁴ раз у 249КП19Т. Согласно рекомендациям стандартов, запас по стойкости у ЭРИ должен как минимум на порядок выше уровня, указанного в ТУ. Однако проведенные испытания показали, что наблюдается катастрофический отказ уже при уровне, всего лишь вдвое превышающий указанный в ТУ.

Основным эффектом, приводящим к деградации выходного МДП транзистора данных оптронов, яв-

ляется накопление объемного заряда в подзатворном диэлектрике и изменение зарядового состояния его поверхности. В связи с этим, основным радиационно-критическим параметром является пороговое напряжение U_{пор}. Эффект носит ярко выраженный дозовый характер. Если есть возможность измерить величину U_{пор}, можно рассчитать коэффициент деградации по формуле:

$$K_{u} = (U_{пор} - U_{пор o})*Д^{-1/2}$$

В нашем случае это не представлялось возможным, так как у исследуемых оптронов нет доступа к электроду затвора. Вне специализированных лабораторий вскрыть корпус и определить необходимые параметры затруднительно. Величина К_и может существенно зависеть от величины напряжения на затворе во время облучения. После импульсного облучения обычно наблюдается отжиг порогового напряжения, величина и скорость которого зависят от электрического режима и температуры. В наших условия отжига параметров после нескольких измерений не наблюдалось.

В результате проведенных испытаний и измерений деградации параметров было определено, что к теоретически полученным значениям РС ЭРИ следует относиться критически и по возможности определять уровень стойкости в необходимых режимах работы соответствующими видами испытаний.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЕРИФИКАЦИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РАСЧЕТНЫЙХ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС»

<u>А. Ю. Логвин¹, Н. С. Аверина, Т. Н. Серова, А. В. Шемякин</u>

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл. ¹ООО «ЦКО», п. Сатис Нижегородской обл.

Введение

Процесс тестирования является неотъемлемой частью жизненного цикла программного обеспечения (ПО). Крупными компаниями, ориентированными на ПО, проводятся исследования влияния ошибок, совершенных на различных стадиях разработки ПО, на общие финансово-экономические показатели успешности реализации проекта. Рядом аналитических агентств, как за рубежом, так и в России, проводились оценки затрат на выявление и устранение ошибок. Стоимость тестирования программного продукта может составлять до 45 % от его общей стоимости. Если не так давно процесс тестирования носил бессистемный характер, проводилось в основном отладочное тестирование и устранение ошибок, полученных от пользователей уже в ходе эксплуатации ПО, то сейчас к тестированию применяется системный подход. «Тестирование выделилось в отдельную область знаний в составе разработки ПО, но быстро пришло понимание того, что тестирование вручную неэффективно, поскольку требует больших трудовых ресурсов и много времени. Первые средства автоматизации тестирования практически представляли собой библиотеки, которые можно было использовать для написания тестов, что требовало от тестировщика умения программировать на уровне разработчика. Современные средства автоматизированного тестирования позволяют создавать автоматизированные тесты с минимальным участием человека.

На рынке коммерческих средств функционального тестирования сегодня представлены главным образом продукты следующих компаний: НР (QuickTest Professional, WinRunner), IBM (Robot, Functional Tester), Borland (SilkTest) и AutomatedQA (TestComplete), представляющие собой средства разработки приложений. [1] Несмотря на то, что выше-перечисленные производители ведут гибкую политику продаж лицензий и применяют динамическое ценообразование, стоимость продуктов высока, составляет 5 000-10 000 USD за лицензию.

В связи с тем, что пакет программ «ЛОГОС» является ресурсоёмким высокопроизводительным продуктом, для его тестирования должны применяться средства, которые позволят производить запуск тестов на вычислительном кластере. Эталонные результаты представляют собой большие наборы данных, что затрудняет использование большинства свободно распространяемых продуктов, применяемых для тестирования ПО без доработки.

Принимая во внимание вышесказанное, для обеспечения автоматизированного верификационного тестирования расчетных программных модулей пакета программ «ЛОГОС» использование вышеперечисленных программных продуктов нецелесообразно и было принято решение разрабатывать собственную систему автоматизированного верификационного тестирования.

Основные подходы к разработке

Для обеспечения гибкости применения системы тестирования она разрабатывалась как кроссплатформенное web-приложение. Это помогло использовать продукт удаленно, доступ к нему возможен с различных устройств под управлением различных операционных систем, с которыми может работать web-браузер. Пользователь таких систем не привязан к месту расположения аппаратной части, где установлена система тестирования, и может использовать его из любой точки мира, где есть рекомендуемое интернет-соединение.

Важным аспектом разработки системы автоматизированного тестирования является необходимость отслеживать изменения тестовых задач и эталонных данных тестов, которые являются эталоном для сравнения полученных результатов. В ходе разработки системы тестирования было принято решение организовать хранилище эталонных данных с использованием программного обеспечения Mercurial, а в базе данных разрабатываемой системы (база верификационных тестов) хранить только путь к эталонным данным и контрольную сумму для обеспечения целостности данных.

Структура системы тестирования

Система автоматизированного тестирования реализована на языке программирования Python с использованием web-фреймворка Django. Она построена по клиент-серверной архитектуре. Сервер приложений и база данных функционирует в ОС Linux, для взаимодействия с пользователем используется любой веб-браузер, входящий в состав базового программного обеспечения всех современных операционных систем (Linux, Windows и т. д.). Функционально система состоит из четырех блоков: 1) интерфейс пользователя 2) сервер управления, 3) счетное поле для запуска тестов, 4) База данных. Блоки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема системы тестирования

В состав системы тестирования входят следующие взаимодействующие между собой компоненты:

- веб-сервер Nginx;
- СУБД PostgreSQL;
- NoSQL база данных Memcached;
- брокер сообщений RabbitMQ;
- подсистема управления;
- подсистема запуска периодических задач;
- подсистема обнаружения новых тестов;

 подсистема обнаружения новых версий тестируемого ПО;

подсистема запуска тестов и анализа результатов.

Веб-сервер nginx предназначен для перенаправления HTTP-запросов из браузера подсистеме управления logos-testsys-backend.

СУБД Postgresql предназначена для долговременного хранения настроек системы, тестов, результатов запуска тестов, а также авторизационных данных пользователей системы.

NoSQL база данных memcached предназначена для хранения временных системных данных, а также для синхронизации процессов доступа к разделяемым ресурсам с целью избежания коллизий, возможных при одновременном изменении их содержимого.

Брокер сообщений RabbitMQ предназначен для регистрации и хранения задач, выполняющихся в неблокирующем режиме, с целью максимально эффективного использования серверных ресурсов, выделенных системе.

Подсистема logos-testsys-backend представляет собой ядро, связывающее компоненты системы в одно целое.

Программные и технические средства

Для функционирования системы тестирования необходимы аппаратные средства, имеющие следующие минимальные характеристики:

центральный процессор, совместимый с X86-64 архитектурой;

- оперативная память не менее 1 Гб;
- свободное дисковое пространство не менее 1 Гб;
- коммуникационные среды Ethernet.

Система тестирования работает под управлением следующих операционных систем:

- Windows 7;
- WindowsServer 2008 R2;
- ScientificLinux 6.x.

Версии сторонних программных продуктов, пакетов и библиотек, используемых при работе системы тестирования:

- PostgreSQLServer 9.4.14
- Mercurial
- RabbitMQ 3.2.4
- MPI
- Slurm
- Python 2.7.6 [1]
- pip 1.5.4
- nginx 1.12.1
- uwsgi 1.9.17.1
- celery 4.1.0
- Django 1.11.6 [2]
- django-admin-list-filter-dropdown 1.0.1
- django-ordered-model 1.4.3
- django-constance 2.0.0
- django-daterange-filter 1.3.0
- django-nested-admin 3.0.20
- django-picklefield 1.0.0
- django-taggit 0.22.1
- paramiko 2.3.1
- pyparsing 2.2.0
- pywinrm 0.2.2
- PyYAML 3.12
- requests 2.18.4
- tabulate 0.8.1
- taggit-selectize 2.3.0

Функциональные возможности

Разработанная система автоматизированного тестирования предназначена для проведения тестирования программного обеспечения, не обладающего графическим пользовательским интерфейсом, в частности счетных модулей пакета программ «ЛО-ГОС» и анализа результатов под различными операционными системами и окружениями.

Система тестирования реализует управление следующими компонентами:

тесты;

 решатели – непосредственно тестируемые компоненты «ЛОГОС»;

3) пользователи и организации;

4) инфраструктура системы тестирования.

Работа в системе тестирования осуществляется через веб-интерфейс. После входа в систему пользователю предоставляется основное рабочее окно, рис. 2.

В этом окне пользователь имеет доступ ко всем функциям системы, для которых у него есть права доступа. Права доступа устанавливаются в специальном разделе. Их может изменять пользователь с правами администратора системы (суперпользователь). На рис. 3 показано диалоговое окно управления доступом пользователей.

Основными шагами процесса тестирования, реализованного в описываемой системе, являются:

1) загрузка эталонных данных от разработчиков;

2) загрузка новых версии тестируемого ПО, в частности решателей «ЛОГОС»;

СИСТЕМА ТЕСТИРО	ВАНИЯ ЛО	DLOC-						DEPO NOVAROBATE N	ОГЕНН АРТЕМ: / ИЗМЕНИТЬ ПАРОЛЬ / ВЫЙ
начала констрика те оти порани	MENTERO C								
СИСТЕМА ТЕСТИРОВАН	ия 'логос'								HACTRONT
TERN	O EHOD TEH	ня вслоній н	CLEATONER	1					
Тесты	Решатель	Версия	0C	Окружение	Время последнего изменения	Путь к исполняемому файлу			md5- сумма исполняемого файла
естовые сценцин.	54	6.0.1431	Windows	Win (mpich2_itt_msvc2008)	22.12.201710.48.40	solvers/5A/5317/601431/windows/mpich2	jb_msvc2008/release/LO	605_5A_x64.exe	926/654/e61e020/d979c4079ce0a0
апуски тестов	SA	6.0.1431	Linux	Linux (mvapich_ib_gnu)	22.12.201710:28:06	solvers/SA/5.3.17/6.0.1431/inux/mvapich_ib	_gnu/telease.fogos_sa		d2cc201aa450aa936004c360fcf70542
апуски сценарнев	TVD	5317.1660	Linux	Linux (mvapich_ib_gnu)	21.12.20171713:38	solvers/TVD/5.2.17/5.2.17.1660/linux/mvapic	h_ib_gnu/release/Logos_1	TVD	2472297749646341273063196354c21
Гераспознанные тесты	HEAT	5.3.17.974	Windows	Win (mpich2_jb_msvc2008)	11.12.2017.09.48.56	solvers/HEAT/5.3.17/5.3.17.974/windows/mp	ich2_/b_msvc2008/releas	e/Logos_HEAT.exe	54ef8d246c344be1cf312a0e3d8bb88a
тапонные данные	SIMPLE	5.317.4572	Linux	Linux (mvapich_ib_gnu)	11.12.2017.09.43.05	solvers/SIMPLE/5.3.17/5.3.17,4572/inux/mva	apich_ib_gnu/release/Logi	DS_SIMPLE_ccf	d9a925a5476457169c64333475659b4
	HEAT	5.3.17.974	Linux	Linux (mvapich_ib_gnu)	11 12 2017 09 31 50	solvers/HEAT/5.3.17/5.3.17.974/linux/mvapic	h_ib_gnu/release/Logos_H	HEAT	4d1e04e094a56a42fd1964c49e396eaa
тешатели	SIMPLE	5.3.17.4572	Windows	Win (mpich2_ib_msvc2008)	11.12.2017.09.26.20	solvers/SIMPLE/5.3.17/5.3.174572/windows	/mpich2_ib_msyc2008/rel	ease/Logos_SIMPLE.exe	7a586d6d648c97963e00e39092f390ac
Terration element	TVD	5.3.17.1656	Windows	Win (mpich2_ib_move2000)	10.12.201712.54.42	solvers/TVD/5.3.17/5.3.17.1656/windows/mp	ich2_ib_move2000,releas	c/Logos_TVD_x64.cxc	2d10cbbo4cb75d4b9ff301a587937bbd
Сценарии запуска	SA	5.3.17.1431	Windows	Win (mpich2_ib_msvc2008)	00.12.201716:27:44	solvers/SA/5.3.17/5.3.17.1431/windows/mpic	h2_ib_msvc2000/release	/L0505_SA_x64.exe	4ac3de01b03dc365a6cdbabec9c4ebb
	SA	5.17.4.1413	Windows	Win (mpich2_ib_msvc2008)	10.11.201712:24:28	solvers/SA/5.4/5.17.4.1413/windows/mpich2	jb_msvc2008/release/L0	GOS_SA_x64.exe	ec7cde6d2782fdD46e97433ba35544af
аополнительно									
рганизации	мои посл	едние тесты							
Мет ки	Нет данны:	x							
Тользоват ельские SQL фильтры									
	пос ледни	е тесты							
нераструктура	Tecr		Версия Р	ешателя			Статус	Результат	Начат в
Іулы Серверов	Interface		HEAT-5.1	7.4.931-windows-Win (mpich2_	ib_msvc2008)-release		Завершен	Пройден	02.04.2018 12:03:29
круж сыня	Interface		HEAT-5.1	7.4.931-windows-Win (mpich2_i	ib_msvc2000)-release		Завершен	Пройден	02.04.2010 11:23:05
ерверные Аккаунты	Interface		HEAT-5.1	7.4.930-linux-Linux (mvapich_it	a,gnu)-release		Завершен	Пройден	02.04.2018 11:22:15
Тастройки	p2_3_modal		SA-6.0.14	131-windows-Win (mpich2_ib_m	nsvc2008)-release		Завершен	Прерван	02.03.2018 12:03:01
	shell_22par		SA-6.0.14	131-windows-Win (mpich2_ib_m	nsvc2008)-release		Завершен	Пререан	02.03.2018 12:02:38
	kubE		SA-6.0.14	31-linux-Linux (mvapich_ib_gn	u)-release		Завершен	Прерван	02.03.2018 12:02:11

Рис. 2. Основное рабочее окно системы

СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ "ЛОГОС" ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ. ЛОГВИН АРТЕМ. / ИЗМЕНИТЬ ПАРОЛЬ /											
начало -> Пользователи											
Выберите Пользовате		ДОБАВИТЬ ПОЛЬЗОВАТЕ.									
Q		ФИЛЬТР									
Действие: 13		► B	ыполнить Выбра	ано О объектов из		активный Все Да					
имя пользователя 🔺	ФАМИЛИЯ	имя	OTHECTBO	ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ	A.Į						
abulanov	Буланов	Алексей	Александрович	cko	аа	группы					
akorchu	Корчуганов	Алексей	Владимирович	cko	av	Все Наблюдатели					
alogvin alogvin	Логвин	Артем	-	cko		access-readonly					
alogvin-admin	Логвин	Артём	-	-		Тестировщики Одератор					
dkulikov	Куликов	Дмитрий	-	cko		-					
edolbili	Долбилина	Екатерина	-	cko	en						
🗆 efim	Бакулин	Ефим	Викторович	-	efi	Все					
elogunov	Логунова	Елена	Сергеевна	cko		Да					
inspector	ΦΜΤΝ	Инспектор	-	-		Нет					
Operator	Operator	Ор	-	-							
sbliznyu	Близнюк	Семен	-	cko							
system	User	System	-	-							

Рис. 3. Диалоговое окно управления доступом пользователей

 запуск тестов с указанными параметрами в автоматическом или, при необходимости, ручном режиме;

4) автоматическое сравнение полученных результатов с эталонными данными;

5) вывод сводной информации тестировщику с возможностью просмотра деталей выполнения теста.

Основная задача системы – запуск тестов и анализ результатов под различными операционными системами и окружениями. Для этого предусмотрена возможность изменять и удалять компоненты счетного поля, переменные системного окружения и серверные аккаунты. Компонентами системного окружения являются настройки библиотеки запуска параллельных задач – MPI и планировщик заданий SLURM (только под OC Linux.). На рис. 4 представлены соответствующие разделы меню. Эти настройки служат для добавления, удаления и изменения серверов под управлением OC Linux или Windows на которых будут запускаться тестовые задачи.

Добавление и изменение решателей производится в разделе меню «Решатели». Решатели, как уже говорилось, представляют собой основной тестируемый компонент «ЛОГОС». В этом разделе пользователь может добавить или изменить сценарий запуска тестов. Так как система разрабатывалась максимально гибкой, то сценарии запуска тестов можно модернизировать на основании простых шаблонов, написанных на сценариях bashили bat под Linux и Windows соответственно. Пример тестового сценария запуска теста и верификации данных представлен на рис. 5.

Действие:		Выполнить Выбрано 0 объектов из	
п вмя	DC	активен	
Win Win	Windows	ø	
П АПК	Linux	0	
🔲 Каснад	Linux	0	
3 Пулы Серверов			
действие	¥ B	ыполнить. Выбрано в объектов из 2	
Заголовок		ОБОЗНАЧЕНИЕ В ПУТИ К РЕШАТЕЛЮ	
Win (mpich2_ib_msv	c 2003)	mpich2_ib_msvc2008	
Linux (mwapich_ih_g	nu)	mvapich_ib_gnu	
Дайствия [Выполнить Выбрано 0-объектов	11 2.
имя пользователя			ю
			inux
logos_tester		L	

Рис. 4. Разделы меню управления настройками серверов

Парамитрытовлуска	
Команды выполнения теста:	[-: (work_dit)/task.slura] [] (echo task.slura does not exist/talse) of (work_dit) \leftrightarrow shatch (work_dit)/task.slura
Каманды верификации тоста:	cat (work_dir_rystem)/tamk.out cat (work_dir_rystem)/tamk.er: >=2 cd (work_dir_rystem)/seak.er: >=2 cd (work_dir_rystem)/seak.er: >=5 (work_dir_rystem)/(tamk_mams).MERUNTS/TENT_MESUNT/te cet = r_(work_dir_rystem)/anglyse.erv : grey FAIL (work_dir_rystem)/anglyse.erv
Прервать при раибке	•

Рис.5. Пример тестового сценария

В базу верификационных тестов можно добавлять новые тесты по заданным критериям, также можно осуществлять поиск и выбор тестов, удалять и изменять тесты. Обнаружение в системе контроля версий Mercurial новых тестов и входных данных, предназначенных для проверки корректности работы решателя, выполняется Системой автоматически.

Система также предоставляет возможность формировать набор тестов из имеющихся в Базе верификационных тестов, и сохранять их для последующего использования.

Также Система осуществляет автоматическое сканирование хранилища на наличие новых версий решателя.

Корректность проведенных тестов подтверждается на основе эталонных данных по заданным критериям сравнения, которые предоставляют разработчики тестируемого ПО. Результаты тестов сравниваются с эталонными данными и система сигнализирует об успешности или не успешности прохождения того или иного теста.

В системе предусмотрено протоколирование действий пользователей и ведется протоколирование процесса тестирования, также формируется краткий сводный отчет по результатам тестирования.

Кроме того, система тестирования позволяет устанавливать различные метки для тестов, добавлять и удалять организации, привлекаемые к тестированию и настраивать различные уведомления.

Функция периодических задач позволяет производить автоматический запуск фоновых задач по определенному расписанию. К этим задачам относятся:

автоматическое обнаружение новых тестов;

• автоматическое обнаружение новых версий решателей.

В процессе разработки система автоматизированного верификационного тестирования расчетных программных модулей пакета программ «ЛОГОС» была развернута на кластере «Каскад» в ООО «ЦКО», произведен тестовый запуск системы. Работоспособность подтверждена на кластере «Каскад», состоящем из 80 вычислительных узлов. Тестирование проводилось с использованием набора тестов, предоставленных РФЯЦ-ВНИИЭФ для выполнения данных работ. На рис. 6 показана статистика запуска тестов.

But	берите вас фи	Sanyor	теста для каме ч	нения								
24					Barrers	-	-	tan.				Pergerane.
		******	(441	14	service .	chalty.	PERMIT	80%10 .	Antonecia	Linear .	-	-4.47
0	100700	5.8	mat_ity!	ina	ine (mant, t, pi)	Saregues	fipriegree	35.02.321013.4447	1987	172213120(korvat)	watthe	(A. Louis J
	1000	54		ine.	ins (realition.pro)	Jangara	No.	2012/01/01/01/01	19911	17231 30 20 (Average	and the	Cite
0	10000	SA.	stellaroor	ing	Unue (mapetultupo)	Заверцен	Пройдля	2612.2010114012	1034	172.21.30.20 (Kerned)	aktrony	fee .
	10057	SA.	C. Margan	feat	Louis Unrajoth_dupo)	Засерати	Пройден	28412211114311	0.04.01	17L21312036+MD	anarchy	Datoraregin be Dampreserve
	10006	sa.	or, it, gas	lma	Linux (model*, 0, pro)	Заверьен	Openigen	28-81-2014 1 1 43:47	10514	172.2130.20(Karkag)	28 (3 Chu	PERMIT
	1005	58.	kub, arth	inux	Linux (mapch,ib,pn)	Заперале	Пройден	26822010124030	17151	172.21.31.20 (Katisad)	akentu	fee Produce
0	10024	SA.	1814_0-07	leve	Linu# (mapeh.ib.pvi)	Jerepute	Opening, exe	26122010114051	11245	17221.0020(Nacead)	arente	ни средскин Приркан
	10023	SA.	CT., (010/0111	in,x	Crue Dimagnitutu.pnD	3449444	Пройден	2012/2019 1248.44	0.07.91	172213122344-68	atorite	Geo expedienciaes
0	100122	úa.	1.5 sterue ave	ina	Lina (mappin,0,ps)	Заверьен	No. April (1997)	2682.201012.47.00	0.0728	172.21.01.20 (Katika)	49110	Bern Zir
	10001	58.	stell,22,54fal	inux	Unix (mapch, b, ps)	Занерате	Пройдля	28.12.2014114150	0.1013	172.21.31.20 (Kackad)	aktrono	ling i

Рис. 6. Окно запуска тестов

В процессе разработки система тестирования проходила процесс верификации путем сравнения результатов запуска тестов из базы верификационных тестов в ручном режиме и с помощью данного программного средства на вычислительных мощностях ООО «ЦКО». Результаты верификации: см. таблицу.

Кол-во тестов	Счетный модуль (решатель)	Результат сравнения ручного и автоматизи- рованного
		тестирования
96	ЮГОС-Прочность (Logos- SA)	совпадает
68	ЛОГОС-Гидродинамика (Logos-SIMPLE)	совпадает
38	ЛОГОС-Тепло (Logos-HEAT)	совпадает
3	ЛОГОС-Аэродинамика (Logos-TVD)	совпадает

Результаты верификации

Заключение

Разработанная система автоматизированного верификационного тестирования расчетных про-

граммных модулей пакета программ «ЛОГОС» была развернута на кластере «Каскад» в ООО «ЦКО» и успешно прошла процесс верификации.

В ходе сопровождения, тестирования и верификации системы автоматизированного верификационного тестирования расчетных программных модулей пакета программ «ЛОГОС» проведены все испытания на соответствие необходимым требованиям Технического Задания на разработку. Система успешно интегрирована в работы математического отделения ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ по разработке счетных модулей пакета программ «ЛОГОС». В ходе использования системы тестирования в ИТМФ был сформирован список доработок, которые планируется реализовать в 2018 г.

Литература

1. Pythondocumentation. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://docs.python.org/2.7/

2. Djangodocumentation. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://docs.djangoproject.com/en/1.11/

3. Schedmddocumentation. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://slurm.schedmd.com/

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ИНТЕРФЕЙСНОГО БЛОКА СМПО-100СА-IT

<u>С. А. Макаров,</u> Ю. А. Малых, А. П. Горячев, П. О. Костин, Е. И. Романчак

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

Введение

Мировой тенденцией в коммуникационных средах является увеличение пропускной способности линков, вследствие чего увеличивается пропускная способность каналов. Например, в устройствах InfiniBand и Omni-Path в настоящие время применяются каналы связи производительностью 25 Гбит/с на линк. На 4-х линках это позволяет организовать канал с пропускной способностью 100 Гбит/с. Разработанная в 2015 году отечественная система межпроцессорных обменов СМПО-10С на данный момент имеет пропускную способность 10 Гбит/с на линк, что соответствует каналу 40 Гбит/с на 4-х линках [1].В новой версии СМПО предлагается обеспечить пропускную способность линка не менее 20 Гбит/с. С целью создания технического задела для следующего поколения системы межпроцессорного обмена выполнено исследование влияния конструкционного материала многослойной печатной платы (МПП) на качество передаваемого высокоскоростного сигнала производительностью не менее 20 Гбит/с.

Интерфейсная плата СМПО-100СА-ІТ

В рамках отработки технологии изготовления МПП с линиями передачи сигналов производительностью 20 Гбит/с, совместно с НИИИС им. Седакова, спроектированы и изготовлены интерфейсные платы СМПО-100СА-IT (рис. 1).



Рис. 1. Интерфейсная плата СМПО-100СА-ІТ

Структурная схема платы демонстрирует связь между компонентами (рис. 2). Плата позволяет использовать как медные, так и оптические кабели стандарта QSFP. Для использования оптических кабелей на плате предусмотрен разъем для подачи внешнего питания 3,3 B, а так же переключатели для настройки.



Рис. 2. Структурная схема платы СМПО-100СА-ІТ

Конструктивно интерфейсная плата СМПО-100СА-ІТ представляет собой плату размером 170х60 мм. На плате присутствует 16 высокоскоростных дифференциальных пар, спроектированных передачи сигнала с производительностью лля 20 Гбит/с (рис. 3). Дифференциальные пары подключены к высокочастотным разъемам OSFP28 и BullsEYE. На плате установлено три разъема стандарта QSFP28(X1,X3,X4) и один BullsEYE(X2), образуя два топологических канала: QSFP28- QSFP28 топологический канал X3-X4, и QSFP28 - BullsEYE топологический канал Х1 – Х2.



Рис. 3. Схема трассировки СМПО-100СА-ІТ

Измерительный стенд

Для проверки качества проектирования и изготовления высокочастотных дифференциальных пар в интерфейсных платах, разработан измерительный стенд (рис. 4).


Рис. 4. Измерительный стенд для проверки дифференциальных пар

Стенд представляет собой отладочную плату на основе ПЛИС с загруженной в нее прошивкой для тестирования. Прошивка включает в себя блок управления и диагностики высокоскоростных приемопередатчиков. С компьютера через пользовательский интерфейс прошивки можно задавать параметры работы приёмопередатчиков и оценивать качество передаваемого / принимаемого сигнала по количеству ошибок в линках, по коэффициенту BER (biterrorratio) или по глазковой диаграмме.

Отладочная плата подключена кабелем стандарта QSFP к разъему X4 и кабелем стандарта BullsEYE к разъемуX2 интерфейсной платы. В разъемы X1 и X3 интерфейсной платы установлены модули Loopback, которые соединяют линии передатчика с линиями приемника.

В ПЛИС генерируется сигнал тестовой последовательности, который по соответствующим кабелям поступает на разъем X2 и X4 интерфейсной платы. По дифференциальным линиям интерфейсной платы сигнал доходит до разъемов X1 и X3 с установленными модулями Loopback и направляется в приемник ПЛИС. Встроенный в прошивку компаратор сравнивает отправленную передатчиком и принятую приемником последовательность. На основе анализа этих данных производится расчет коэффициента BER и построение глазковой диаграммы.

Результаты тестирования

Параметр BER, характеризующий качество приема информации, это вероятность принятия ошибочного бита, которая вычисляется как отношение количества ошибочно принятых битов к общему количеству принятых битов. Считается, что для надежного функционирования коммуникационных систем, коэффициент BER в канале передачи данных должен составлять не более порядка 10⁻¹². На основе приведенного в п. 2 стенда, на скорости передачи данных 20 Гбит/с, протестированы оба топологических канала интерфейсной платы СМПО-100СА-IT.Для всех линков получено значение BER 10⁻¹³, что является достаточным для передачи сигнала с низкой вероятностью ошибки.

Так же получены глазковые диаграммы для каждого линка (рис. 5, рис. 6). Глазковая диаграмма это суммарный вид всех битовых периодов измеряемого сигнала, наложенных друг на друга. Глазковая диаграмма позволяет быстро и наглядно определить качество цифрового сигнала и обнаружить ошибки, вызванные большим уровнем помех и искажений в канале передачи.



Рис. 5. Глазковая диаграмма линка 1 канала Х3 – Х4



Рис. 6. Глазковая диаграмма линка 1 канала Х1 – Х2

По глазковым диаграммам видно, что раскрытие глаза каналаX1 – X2лучше, чем каналаX3 – X4. Это может объясняться тем, что у канала X3 – X4рядом со вторым разъемомQSFP28 присутствуют переходные отверстия, которые вносят помехи в передаваемый сигнал.

Получены частотные характеристики каналовинтерфейсной платы СМПО-100СА-ІТпри скорости тестовой последовательности 10, 15, 20 и 25 Гбит/с. По результатам измерений построены графики зависимости раскрытия глазковой диаграммы от скорости передаваемого сигнала (рис. 7, рис. 8).



Рис. 7. Зависимость раскрытия глазковой диаграммы от скорости канала X3 – X4

Из графиков видно, что канал X1 – X2 на всех скоростях работает стабильно, при достаточно большом раскрытии глаза. Канал X3 – X4 имеет раскрытие глаза в 1,5-2 раза меньше, чем канал X1 – X2,



Рис. 8. Зависимость раскрытия глазковой диаграммы от скорости канала X1 – X2

на соответствующих скоростях. На скорости 25 Гбит/с X3 – X4 уже не работоспособен. Больший уровень помех и искажений в каналеХ3 – Х4может объясняться тем, что дифференциальные пары канала в два раза длиннее, и рядом со вторым разъемом QSFP28 присутствуют переходные отверстия. На целевых 20 Гбит/с оба канала способны передавать информацию с очень малой вероятностью принятия ошибочного бита.

Заключение

Исследование показало успешный опыт проектирования и производства на отечественных предприятиях МПП с линиями передачи высокопроизводительных сигналов. В ходе исследования для всех линков получены коэффициенты BER и построены глазковые диаграммы. Анализ полученных данных позволяет говорить о том, что подобранный материал, разработанный стек слоев, трассировка и компоновка платы обеспечивают производство на отечественных предприятиях МПП, работающих с сигналами производительностью 20Гбит/с. Принципы проектирования и изготовления будут использованы при разработке аппаратных модулей СМПО нового поколения.

Литература

1. Холостов А. А. Масштабируемая система межпроцессорных обменов 10 G // [Электронный ресурс] – Национальный суперкомпьютерный форум, 2013. Режим доступа: www.nscf.ru.

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАТОРА

<u>В. А. Малахин,</u> С. Н. Гончаров

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Радиолокационная информация – это совокупность сведений об объектах (радиолокационными целях), извлекаемая в результате приема и обработки (анализа) электромагнитных волн. Эти сведения могут касаться наличия или отсутствия целей в заданных участках пространства, их координат, скорости и траектории движения, а также характеристик цели. Средством получения радиолокационной информации является радиолокатор.

Как правило, зондирующий сигнал радиолокационной станции (РЛС) представляет собой последовательность импульсов. Параметры зондирующего сигнала, такие как длительность импульсов, период следования импульсов, несущая частота, диапазон изменения несущей частоты, наличие и характер внутриимпульсной модуляции, определяются зависимости требуемых В от характеристик РЛС.

Создание программной модели позволит подобрать необходимые параметры зондирующего сигнала и выбрать наиболее эффективный способ обработки принятого сигнала РЛС, в соответствии с назначением РЛС и предъявляемым к ней требованиям.

Постановка задачи

Программная модель РЛС должна выполнять следующие требования:

 имитировать прием сигнала, отраженного от движущейся цели;

 включать в расчет наложение сигнала от пассивных помех и собственного шума приемника на полезный сигнал;

 выполнять обработку имитированного сигнала и отображать результат в терминах скорости и расстояния до цели;

 определять наличие цели и её параметры с помощью выбранного алгоритма в условиях высокого уровня пассивных помех.

Обзор типов радиолокационных станций

В данной работе рассмотрены РЛС с селекцией движущихся целей (РЛС СДЦ) и импульсно-доплеровская РЛС, так как они позволяют определять движущие цели на фоне значительных пассивных помех. Также они являются импульсными, что упрощает их практическую реализацию.

Радиолокатор с селекцией движущихся целей

Основной целью РЛС СДЦ является подавление отражений от неподвижных или медленно движущихся мешающих отражателей, таких как здания, холмы, деревья, дождь и т. п. Фильтр СДЦ позволяет сравнивать два или больше интервалов повторения импульса, исключая сигнал от неподвижных пассивных помех.

Импульсно-доплеровский радиолокатор

Импульсно-доплеровский радиолокатор – это радиолокатор, в котором обнаружение цели основано на эффекте Доплера. Эффект Доплера – это изменение частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемое наблюдателем (приёмником), вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя (приёмника).

выделяют Импульсно-доплеровские РЛС и усиливают сигнал цели в пределах конкретной доплеровской полосы, не пропуская сигналы пассивных помех и другие отраженные сигналы, расположенные вне пределов интересующей доплеровской полосы. Это реализуется с помощью набора перекрывающихся доплеровских фильтров.

Реализация программной модели импульсно-доплеровской РЛС

Импульсно-доплеровская РЛС с переменной частотой следования импульсов и переменной несущей частотой – оптимальный вариант для обнаружения цели и однозначного определения параметров ее движения. Также используется внутриимпульсная фазовая модуляция сигнала, для достижения высокого разрешения по дальности.

Структура сигнала изображена на рис. 1 и представляет собой когерентные пачки импульсов, где N – количество пачек, К – количество импульсов в пачке, a (j, i) – j-й импульс в i-ой пачке. Изменения несущей частоты и периода следования импульсов происходят от пачке к пачке.





Рис. 2. Структурная схема моделирующей программы

На рис. 2 представлена структурная схема модели РЛС. Сначала программной задаются параметры сигнала, приема и цели. К параметрам сигнала относятся: частота дискретизации (Гц), длительность дискрета фазовой внутриимпульсной манипуляции (такты АЦП), несущая частота (Гц), диапазон изменения несущей частоты (Гц), средняя импульсов, скважность диапазон изменения скважности импульсов. Дополнительно указывается файл со структурой фазовой манипуляции, способы его генерации в данной работе не рассматриваются.

К параметрам цели относятся: дальность до цели (м), скорость цели (км/ч). Так же вводятся параметры собственного шума приемника: среднеквадратическое отклонение (CKO) шума (разряды АЦП), отношение сигнал шума на входе (дБ). К параметрам стационарной помехи относятся: отношение помеха-шум на входе (дБ), СКО скорости статической помехи (Км), закон распределения скоростей стационарной помехи (нормальный или равномерный). В параметрах приема указываются: минимальная и максимальная дальность приема (м), минимальная и максимальная радиальная скорость (км/ч). В параметрах алгоритма указывается количество импульсов в пачке и количество пачек импульсов.

Описание процесса обработки данных

Блок формирования строба приема генерирует отсчеты синфазной и квадратурной составляющей принятого сигнала по заданным параметрам цели, приема и сигнала. Вся дальнейшая обработка выполняется и для синфазной и для квадратурной составляющей приемника создается генератором. Собственный шум случайных чисел с нормальным распределением. Сигнал статической помехи генерируется как множественное отражение излученного сигнала в каждом элементе разрешения РЛС. Фактически, в каждом элементе разрешения находится объект, движущийся со случайной скоростью в пределах заданных параметров. Распределение скоростей подчиняется либо нормальному, либо равномерному закону распределения по выбору.

Блок гетеродинирования имитирует перенос частоту сигнала с несущей на промежуточную, для дальнейшей обработки.

Операция снятия внутриимпульсной модуляции представляет собой свертку со структурой отправленного сигнала. Это необходимо для того, чтобы выделить сигнал, с той же внутриимпульсной модуляцией, что и был отправлен.

Когерентное накопление выполняется только для когерентного периода сигнала, то есть отдельно

для каждой пачки импульсов, так как частота сигнала и ЧПИ меняются от пачке к пачке. Когерентная обработка включает в себя набор равномерно расставленных на всем необходимом диапазоне радиальных скоростей доплеровских фильтров, количество фильтров соответствует количеству гипотез по скорости цели.

Некогерентное накопление суммирует пο модулю результаты всех доплеровских фильтров всех когерентных пачек, пример результата показан на рис. 3. Ось абсцисс отображает скорость цели, ось ординат отображает расстояние до цели. Ось аппликат отображает амплитуду накопленного сигнала в данной точке. Максимум, на данном рисунке, соответствует заданным параметрам цели. Полученный массив данных требует дальнейшей обработки для вынесения решения о наличии цели и создании отметок целей. Это можно сделать, например. установив порог обнаружения. но подробное рассмотрение алгоритмов создания отметок выходит за рамки данной работы.



Рис. 3. Результат некогерентного накопления сигнала

Параметры моделирования: – частота дискретизации: 50 МГц, несущая частота: 4 ГГц,

 средняя скважность: 5, диапазон изменения скважности: 1,

дальность до цели 30000 м, скорость цели: 500 км/ч,

- отношение сигнал-шум на входе: -35 дБ,

– отношение помеха-шум на входе: -40 дБ,

- СКО скорости статической помехи: 3 Км/ч,

- минимальная дальность приема: 29800 м,

– максимальная дальность приема: 30200 м,

– минимальная радиальная скорость: 0 м,

– максимальная радиальная скорость: 900 м,

- количество когерентных пачек импульсов: 8,

- количество импульсов в пачке: 8,

 предполагаемая область стационарной помехи: 10 км/ч,

 строб приема включает в себя: собственный шум, сигнал стационарной помехи и сигнал цели.

Заключение

Таким образом, В данной работе были рассмотрены различные типы радиолокаторов. Для реализации был выбран импульсно-доплеровский радиолокатор внутрипериодной с модуляцией. разработана программная модель, которая имитирует прием сигнала, отраженного от цели с идеализиантенной. рованной Результаты моделирования соответствуют ожидаемым, и программа позволяет оценить результирующие характеристики радиолокатора в зависимости от заданных параметров сигнала, цели, приема и помеховой обстановки.

Литература

1. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. — 416 с.

2. Справочник по радиолокации. В 2 книгах / Под редакцией М. И. Сколника. Пер. с англ. по общей ред. В. С. Вербы, В 2 книгах. Москва: Техносфера, 2014.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКО-ЖЕСТКОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<u>Т. В. Родионова</u>, Ю. А. Анисимов, Н. Н. Вовк, Ю. В. Клевнов, А. В. Корепанов, Е. Н.Кузьмин¹, Д. А. Лучкин, Д. В. Сергеев, М. А. Царев, С. В. Шмагин

> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл. ¹ФГУП «ПСЗ», г. Трехгорный Челябинской обл.

В настоящее время Российская оборонная промышленность проходит переломный момент. Электронные модули, разработанные по устаревшим, советским технологиям уже не отвечают современным требованиям к конструкции и технологичности, что заставляет применять новые конструкции, отвечающие мировым стандартам. При этом в отрасли существует жесткое ограничение на применение иностранных материалов, что затрудняет применять ряд распространённых в мире технологий.

Одним из решений при изготовлении электронных модулей являются гибко-жесткие печатные платы (ГЖПП). Применение данной конструкции позволяет исключить большую часть операций, связанных с объемным монтажом, значительно повысить надежность и технологичность электронного модуля и дает возможность полностью изготавливать электронный модуль методом поверхностного монтажа и исключить влияние «человеческого фактора» при сборке электронного модуля [1].

Целью данной работы являлась оптимизация конструкции существующего электронного модуля с применением ГЖПП из материалов российского производства с учетом возможности изготовления электронного блока методом поверхностного монтажа.

Существующий электронный модуль (ЭМ) состоит из 2 электронных блоков на печатных платах, диаметром 28 мм каждая. На каждой плате располагаются микросхемы в корпусах H16.48-2 и ряд пассивных компонентов. Платы размещаются на каркасе, закрепленном на электрическом соединителе типа СНЦ-144.

Существующий ЭМ имеет ряд недостатков, один из основных - непригодность к автоматизированной установке компонентов. Традиционный ручной проводной монтаж трудоемок. При проводном монтаже велико влияние человеческого фактора на качество конечного ЭМ. Следствие этого - нестабильное качество электронных блоков, зависящее от квалификации монтажника, его эмоционального состояния. В мировой практике ручные операции при монтаже активно вытесняются автоматизированной установкой компонентов, как методом поверхностного монтажа, так и автоматизированной установкой (селективной пайкой) элементов со штыревыми выводами. Дополнительным будет выигрыш по времени изготовления ЭМ, оно может в разы превышать время при ручном монтаже.

Как было сказано выше, одним из способов отказа от объемного монтажа является использование гибко-жестких печатных плат. Однако в настоящее время для внедрения технологий существует ряд ограничений, ключевым из которых является ограничение заказчиком применения иностранных материалов. Существующий процесс согласования применения иностранных материалов очень трудоемок и длителен, а зачастую, с учетом политических рисков невозможен.

Был проведен анализ производителей базовых материалов для ГЖПП. По результатам анализа определены три основные группы материалов:

1) материалы фирм Dupont (США), Hitachi (Япония). Данные материалы премиум-класса от лидеров мирового рынка. При этом, учитывая политическую обстановку и агрессивную санкционную политику стран-производителей, шанс согласования применения данных материалов заведомо низок;

2) материалы фирмы ITEQ (Китай). Данные материалы представлены средней качественной и ценовой группой материалов. В настоящее время в отрасли ведется процесс согласования с Заказчиком применения данных материалов. При этом до завершения этого согласования их применение в конструкции очень рисковано;

 отечественные материалы. С применением данных материалов со стороны Заказчика обычно вопросов не возникает, однако качество этих материалов очень часто нестабильно.

Был проведен анализ производителей базовых материалов для ГЖПП в Российской Федерации (см. табл.). Фольгированные диэлектрики в России выпускали десять заводов с объемом производства на начало 90-х годов около 22 тысяч тонн в год. Сегодня их производят лишь ОАО «НИИ электронных материалов» (Владикавказ), АНО НТЦ «Элифом» (Москва) и ООО «Технотех» (Йошкар-Ола) малыми объемами. На остальных предприятиях производство ликвидировано.

Таким образом, единственным отечественным производителем материалов для ГЖПП является АНО НТЦ «Элифом», Москва, его материалы приняты в качестве главного варианта. В качестве альтернативного было решено попробовать изготовление из материалов фирмы ITEQ (Китай).

Состояние Российских предприятий по производству фольгированных диэлектриков

	Наименование предприятия	Комментарии
1.	АНО НТЦ «Элифом» г. Москва	 – единственное предприятие, производящее полный набор материалов для ГЖПП; – малые производственные мощности; – по отзывам технологов предприятий отрасли качество материалов посредственное.
2.	ОАО «НИИ электронных материалов» (ОАО «НИИЭМ») г. Владикавказ	 малые производственные мощности; ограниченные возможности производства не производят полного спектра материалов для ГЖПП
3.	ООО «Технотех» г. Йошкар-Ола	 малые производственные мощности; не производят полного спектра материалов для ГЖПП производство только для собственных нужд ЗАО «НОВАТОР» отсутствует собственная пропитка стеклоткани, пропитка производится в Китае.

Следующим ограничивающим фактором при разработке и производстве ГЖПП является несовершенство отечественных стандартов. Для разработки было решено применять требования стандарта IPC 2223A [2, 3, 4], для изготовления и испытаний немного устаревший ГОСТ 23752-79.

Была разработана тестовая плата. Разработка велась в САПР Altium Designer 17.0, применение которой оптимально для проектирования таких плат, так как позволяет складывать плату при разработке. При разработке были учтены требования к конструкции, заложенные IPC 2223A и статьях в специализированных журналах [5]. Также учитывались требования к конструированию электронных блоков, предназначенных для автоматизированной установки компонентов методом поверхностного монтажа [6, 7] и селективной пайки [8]. Было изготовлено по пять тестовых плат из материалов Элифом и ITEQ. Тестовая ГЖПП из материалов АНО НТЦ Элифом представлена на рис. 1, ГЖПП из материалов ITEQ представлена на рис. 2.



Рис. 1. Тестовая ГЖПП из материалов АНО НТЦ Элифом



Рис. 2. ГЖПП из материалов ITEQ

Для каждого набора материалов было отобрано по одному образцу для проведения типовых испытаний в соответствии с ГОСТ 23752-79. Результаты испытаний положительные. Учитывая проблемы с получением разрешения на применение китайских материалов, в данный момент решено для дальнейшей отработки применять материалы производства АНО НТЦ Элифом, Москва.

Таким образом, в настоящее время производство ГЖПП из отечественных материалов возможно, с оговоркой на нестабильное качество производства материалов. Дальнейшая работа будет вестись в направлении исследования конструкторских аспектов автоматизированной установки компонентов на печатную плату.

Литература

1. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Назначения, свойства и характеристики.www.ncab.ru

2. Акулин А. И. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC 2223А. Часть 1 // Электронные компоненты. 2005. № 10.

3. Акулин А. И. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC 2223А. Часть 2 // Электронные компоненты. 2005. № 11.

4. IPC-2223A Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. www.ipc.org

5. ГОСТ 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия.

6. Акулин А. И. Проектирование гибко – жестких печатных плат. Технологии в электронной промышленности, № 8'2007.

7. ГОСТ Р МЭК 61191-1–2010 Печатные узлы. Часть 1 Поверхностный монтаж и связанные с ним технологии. Общие технические требования.

8. IPC-SM-780 Component packaging and interconnecting with emphasis on Surface Mounting. www.ipc.org

9. Ференбах М. Селективная пайка гибких плат. Технологии в электронной промышленности, № 8'2007.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

<u>Г. А. Семёнов</u>, М. И. Мосина, М. А. Иошкина, И. Ю. Дроздов, Г. В. Афонина

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

В Институте Ядерной и Радиационной Физики (ИЯРФ) создан научно-производственный комплекс федерального уровня, обеспечивающий полный цикл исследований, проектирования, изготовления и эксплуатации моделирующих установок на базе исследовательских импульсных ядерных реакторов (ИЯР).

Уникальные характеристики ИЯР обеспечивают возможность исследования широкой номенклатуры объектов (образцов техники, материалов) в широком диапазоне уровней их дозовой нагрузки, зависящей от параметров гамма – нейтронного поля.

Диагностика параметров нейтронного поля в облучательных экспериментах на ИЯР ИЯРФ проводится преимущественно с использованием активационных методов. Отличительной чертой этих методов является присутствие в них серьезного математического аппарата, требующего использования комплексного программного обеспечения.

В мировой практике нет единого стандарта обработки результатов активационных измерений. Большое разнообразие спектров изотопных источников и ядерно-физических установок, решаемых с их помощью задач, требования к оперативности получения результата, материальные и вычислительные возможности лабораторий и институтов, проводящих активационные измерения, диктуют разные подходы к решению данного вопроса. В связи с этим представляется целесообразным развивать уже существующие во ВНИИЭФ и хорошо зарекомендовавшие себя методы обработки.

Наиболее часто используемые программные пакеты STATISTICA, MathCad, MathLab, MATHEMATICA и т. п. обладают мощным потенциалом математической обработки, являясь во многом специфической средой программирования. Однако с их помощью весьма затруднительно обеспечить гибкий и удобный пользовательский интерфейс и настройки узкоспециализированных алгоритмов.

В связи с этим в рамках применяемой на ИЯР ИЯРФ активационной методики МИ 2804-2003 используется специализированное. По собственной разработки «КАСКАД-Д» – модернизированная версия программы «КАСКАД» [1].

Программа «КАСКАД-Д» – это комплексная вычислительная программа для расчета характеристик полей нейтронов ИЯР по результатам измерений с активационными и делительными (интегральными) детекторами (обобщенная совокупность методов, базирующихся на использовании формы отклика нейтронного детектора для определения формы спектра нейтронов и применения полученного спектрального решения в прикладных целях).

Программа «КАСКАД-Д» основывается на файловой системе организации хранения данных и автономной реализации. При работе с файлами нужно постоянно держать под контролем много вспомогательных параметров, знать, под каким именем сохранена информация о конкретном событии, будь то эксперимент или данные сопроводительных расчетов, окончательные или промежуточные.

Результаты обработки экспериментальных данных по программе «КАСКАД-Д», а также сопутствующая информация об условиях проведения эксперимента хранятся в виде отдельных файлов на разных носителях и в печатном виде в различных архивах и на рабочих местах.

Очевидно, что разрозненность и фрагментарность экспериментальной информации, неизбежной при подобной организации хранения данных, вызывает ощутимые неудобства при планировании очередных экспериментов.

Внедрение информационной системы (ИС), связывающей воедино процесс обработки экспериментальных данных и хранение всей необходимой информации об эксперименте, позволит значительно упростить работу научного персонала и исключить неизбежные ошибки и лишние действия.

После всестороннего анализа нужд персонала, задействованного в активационных измерениях, было принято решение:

 разработать информационную систему архитектуры «клиент-сервер»;

организовать систему классификации и систематизации данных;

 определить типы данных, входные, расчетные и выходные значения;

интегрировать разработанную базу данных с программой «КАСКАД-Д».

Такой подход позволяет сохранить разработанные алгоритмы обработки экспериментальных данных, дополнив информационную систему необходимыми алгоритмами хранения и поиска данных.

Разработанная ИС на базе «КАСКАД-Д» может быть внедрена и использована в составе СВС РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Разработка информационной системы проводилась с учётом технических и программных возможностей подразделения и с учетом требований, изложенных в техническом задании.

Информационная система обработки данных получаемых на ядерно-физических установках отвечает следующим требованиям:

 открытая, модульная архитектура, позволяющая добавлять в систему новые программные модули, а так же изменять существующие без глобальных изменений остальной части программы;

 в состав средств разработки ИС должно входить базовое и прикладное программное обеспечение;

- многопользовательский режим работы ИС;

 информационная система должна иметь основные режимы работы: ввод, корректировка и удаление данных;

 – результаты оценки должны выводиться в текстовом, табличном или графическом виде на экран монитора и(или) в печатной форме;

– сохраняются алгоритмы обработки данных программы «КАСКАД»;

 получение полной или выборочной информации о каждом проведенном эксперименте в текстовом, табличном, графическом виде на экран монитора и (или) в печатной форме.

При создании информационной системы были использованы импортонезависимые программные средства.

ИС имеет архитектуру клиент-сервер. Это означает, что разработано ядро БД, в данном случае для создания базы данных была выбрана СУБД PostgreSQL [2].Это свободно распространяемая система управления базами данных, которая не имеет ограничений ни по максимальному размеру базы данных, ни по максимуму записей или индексов в таблице. PostgreSQL входит в перечень разрешенного программного обеспечения и имеет сертификат ФСТЭК.

Также нами был реализован многопользовательский режим работы с ИС, обеспечив выполнение требований по защите информации от несанкционированного доступа. В результате мы обеспечили идентификацию и аутентификацию пользователей в ИС.

Разработка клиентской части информационной системы проводилась в среде визуального программирования – Borland Delphi 7.0 [3, 4], как и алгоритмы обработки экспериментальных данных программы «КАСКАД-Д».

Клиентская часть – программа, состоящая из программных модулей, форм и различных запросов.

При создании ИС нами в первую очередь были определены массивы информации: перечень входных данных, организовали «справочники», чтобы избежать дублирования и сократить время на ввод данных пользователями в ИС. Отдельно были разработаны шаблоны выходных документов.

Организация базы данных и дополнение программного кода программы «КАСКАД-Д» позволяет отказаться от файловой системы хранения данных в пользу разработанной базы данных (БД). Для передачи данных из БД в «КАСКАД-Д» и обратно нами использовались стандартные функции среды разработки Delphi7. Схема передачи информации, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема организации обмена данных в ИС на базе «КАСКАД-Д»

В кодах «КАСКАД-Д» используется структурный тип данных – запись. Данный тип представляет собой массив для хранения разнотипных данных. На каждое поле записи можно сослаться, используя имя структурного типа данных и имя поля внутри типа данных. Данная структура предусматривает минимизацию памяти, отведенной под запись данных, что при больших объемах положительно скажется на экономии места и времени обработки информации. В силу своей компактности запись в Delphi обеспечивает более быстрый механизм передачи подобных групп данных, чем классы данных. Алгоритм передачи данных осуществляет переадресацию между полями записей и полями БД.

Актуальная версия ИС на базе «КАСКАД-Д» является программным продуктом, прошедшим полное тестирование и опытную эксплуатацию.

Также в ИС добавлены возможности вывода и сохранения статистических данных, в частности можно просмотреть количество работ на определенных установках, добавлены возможности структурированно хранить отчеты по проведенным опытам.

В заключение можно отметить, что ИС, созданная на базе «КАСКАД-Д», своим функционалом позволила повысить эффективность работы сотрудников научно-исследовательских отделов, задействованных в проведении облучательных экспериментах на ИЯР ИЯРФ.

Литература

1. Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С Метод расчета спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД. Измерительная техника, №5, 2003г., С.62-68.

2. Иван Панченко. PostgreSQL: вчера, сегодня, завтра. Открытые системы. СУБД, №03, 2015.

3. Фаронов В. В., Шумаков П. В. Delphi 7. Руководство разработчика баз данных. М.: Нолидж, 2013.

4. Дарахвелидзе П. Г., Марков Е. П. Программирование в Delphi 7. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2012.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ НА БЛОЧНОМ УРОВНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ В ОБЛАЧНОМ ХРАНИЛИЩЕ

Ю. О. Трусова

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

Облачные вычисления – это современная парадигма, позволяющая динамически распределять ресурсы Интернета с минимальными эксплуатационными затратами. Облачные хранилища позволяют пользователю экономически эффективно использовать информационные ресурсы, но возникает ряд проблем, касающихся безопасности. В частности угроза их целостности, доступности, конфиденциальности. В облачных вычислениях обеспечение целостности данных является одной из основных проблем, поскольку пользователь не может контролировать механизмы безопасности для защиты данных.

Целостность данных - это форма защиты данных от потери и повреждения, вызванных аппаратным, программным обеспечением или сбоем сети [1]. Ошибка данных может произойти случайно, за счет ошибок программирования, или быть результатом злонамеренного нарушения или взлома. Обеспечение целостности данных – одна из важнейших проблем, поскольку высокий уровень надежности способен гарантировать правильность, доступность, качество, надежность, безопасность, конфиденциальность, точность хранящихся данных, а так же позволяет пользователю быть уверенным, что информация не изменяется и не повреждается поставщиком услуг или другими пользователями.

Кроме высокого уровня надежности от современных методов обеспечения целостности данных требуется высокая производительность. Производительность измеряется с помощью таких параметров, как время вычисления, время шифрования и время дешифрования, количество используемой памяти и размер выходных данных. Пока невозможно провести аутсорсинг данных с использованием механизмов облачного хранилища, так как он не поддерживает локальную копию. Следовательно, криптографические меры не могут использоваться непосредственно для контроля целостности данных. Поэтому необходима третья сторона - внешний сторонний аудитор (ТРА). ТРА - это независимый орган, обладающий возможностями для мониторинга целостности данных, переданных сторонним клиентом, а также информирующий о повреждении или потере данных, если такие имеются [2]. Но для его работы требуется отдельная память, а также большее количество времени для проверки целостности данследовательно, общая производительность ных: снижается. В настоящее время специалисты по программному обеспечению используют ряд практик для обеспечения целостности данных, который включает в себя шифрование данных, резервное копирование данных, средства контроля доступа, проверку ввода, проверку данных, обнаружение ошибок и коррекцию при передаче и хранении данных. Эффективность методов проверки нарушения данных зависит от служебных данных связи, издержек памяти, размера ключа, времени шифрования, времени дешифрования и времени вычисления. Целостность данных можно обеспечивать на двух уровнях: вопервых, чтобы предотвратить повреждение данных, во-вторых, обнаружить и исправить нарушение данных. В данной работе акцент сделан именно на обнаружение повреждений данных.

Предлагаемый к рассмотрению метод основан на методе вычисления определителя матрицы (DF) для повышения, как целостности данных, так и безопасности. Перед передачей серия данных разбивается на N-матриц, где N задается следующим образом

$$N = \frac{o \delta u e e \kappa o n u e c m b o d a h h h h x}{(d \times d)},$$
(1)

где $(d \times d)$ — количество элементов на матрицу. Определитель каждой матрицы вычисляется и добавляется в пакет вместе с данными. На этапе получения он сравнивается с определителем полученных данных, для обеспечения целостности.

Отмечается, что существует один недостаток данного метода – случай, когда DF равен нулю. Определитель равен нулю, если какая-либо из строк пропорциональна другой строке. То же самое верно и для столбцов, или, если одна из строк или столбец имеют только нулевые значения. Кроме того DF не отображает изменений, если некоторые из строк или столбцов взаимозаменяемые. Чтобы решить эту проблему используем метод вращения матрицы. Каждый элемент матрицы восстанавливается с матричным методом, с использованием исходной матрицы и преобразованной матрицы. Наборы вращательных матриц вычисляются и добавляются к каждой исходной матрице данных.

Например, значение DF для следующей матрицы равно нулю. Применяя предложенный метод, мы получаем новую матрицу, определитель которой уже не является нулем (см. рис.1).



Рис. 1. Применение метода вращения к матрице (3×3)

Затем для каждого полученного определителя с помощью комбинации алгоритмов SHA-1 и AES формируем цифровую подпись. В конце перед самой передачей или хранением данных в облаке для повышения безопасности применяем раскрашивание данных. На стороне приемника оба детерминанта снова пересчитываются, и дегенерируют хэш-последовательность, затем сравниваются со значениями отправителя. Совпадение данных гарантирует, что не было изменений во время передачи, иначе были бы нарушены конкретные блоки принятых данных. Результаты предлагаемой системы показывают, что метод матричной связи превосходит другие метод проверки целостности данных, а также обеспечивает конфиденциальность данных, их защиту от несанкционированных пользователей. Рис. 2 показывает архитектуру предлагаемой системы.



Рис. 2. Алгоритм матричного метода обеспечения целостности данных

Приведем основные этапы предлагаемого метода:

– передатчик:

 исходные данные поступают в виде строки. Каждая строка преобразуется в байтовый формат, разделение на блоки;

2) преобразование каждого блока в квадратную матрицу;

 вычисление определителя для каждой матрицы;

4) постройка новой матрицы с использованием метода матричного набора на основе блоков, чтобы исключить нулевой DF;

5) вычисление определителя для матриц, построенных на этапе 4;

6) генерация хэш-функции алгоритмом SHA-1 для всех вычисленных определителей;

 шифрование значений хэширования с помощью алгоритма AES для генерации цифровой подписи;

 применение раскрашивания данных для каждой цифровой подписи, полученной на этапе 7;

9) хранение цветных данных в облачном хранилище.

– приемник:

1) восстановление цвета из цветных данных;

2) декодирование полученных данных;

3) восстановление преобразованных матриц;

4) вычисление их определителей;

5) восстановление исходных матриц и вычисление их определителей;

6) сравнение результатов, полученных на этапах 1, 2, 4, 5 отправителя с этапами 8, 6, 5, 3 приемника соответственно;

7) если результаты одинаковые на всех сравниваемых шагах, то целостность данных не нарушена. Если на одном из шагов данные различаются, то нарушен конкретный блок данных.

Неоднократное сравнение результатов, полученных на разных этапах вычисления, обеспечивает большую надежность, так как позволяет минимизировать вероятность ошибки.

Для подтверждения теоретической модели проведем моделирование алгоритма матричного метода для данных разного размера. Результаты экспериментов можно представить в виде таблицы, показывающей точности с точки зрения количества дефектов, обнаруженных для разных размеров данных.

Точности обнаружения дефектов для блоков данных, разного размера

Размер данных в байтах	Фактическое количество дефектных блоков	Количество де- фектных блоков, обнаруженных предложенным методом	Точность предлагаемого метода (%)
10000	08	08	100
15000	10	09	99,91
20000	12	12	100
22000	14	13	99,91
30000	17	15	99,66
33000	19	19	100

Графически полученные результат представлены на рис. 3



Рис. 3. Проверка точности обнаружения дефектов для блоков данных, разного размера

В докладе представлен способ повышения безопасности данных путем улучшения проверки целостности данных в облачном хранилище без использования ТРА. Исходные данные делятся на блоки, где каждый блок помещается в квадратную матрицу. Элементы матрицы помещаются в новую форму с использованием хэширования, которое приводит к экономии памяти за счет уменьшения битов, а также для повышения точности данных.

Кроме того, цифровая подпись применяется к каждому определителю матрицы для повышения надежности данных. Эта модель также использует раскраску данных для шифрованной цифровой подписи для повышения безопасности данных, которая помогает пользователю проверять наличие несанкционированного доступа к данным.

В предлагаемом методе точность поддерживается на высоком уровне путем двухкратной перестановки данных. Перестановка осуществляется через исходную и преобразованную матрицы. Хотя для этого требуется более долгие вычисления, зато обеспечивается высокий уровень точности и безопасности данных. Таким образом, здесь представлена попытка обеспечить новое понимание безопасности облачного хранилища путем обнаружения нарушений целостности данных на уровне блоков во время хранения или передачи.

Литература

1. Kahate, A. Cryptography and Network Security. New Delhi:Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2008.

2. Govinda, K., Gurunathprasad, V. and Sathishkumar, H. Third Party Auditing for Secure Data Storage in Cloud through Digital Signature Using RSA. // International Journal of Advanced Scientific and Technical Research,2012,Vol 4

3. Camara, L., Li, J., Li, R. and Kagorora, F. Block-Based Scheme for Database Integrity Verification. // International Journal of Security and Its Applications, 2014, Vol.8, P.25 – 40.

4. Дроздова И. И., Жилин В. В. Безопасность облачных хранилищ // Технические науки в России и за рубежом: материалы VIIМеждунар. науч. конф. – М.: Буки-Веди, 2017. – С. 16–18.

5. Stallings, W. Cryptography and Network Security. 4th Edition, Pearson Prentice Hall, 2006.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕГРАТОРА ЛОГОС-МИП С СУПЕР-ЭВМ

А. А. Тюндина, А. Г. Надуев, А. Д. Черевань, Д. А. Жуков, Д. А. Кожаев

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

Введение

Модульная интеграционная платформа (МИП) предназначена для решения ряда задач в рамках пакета программ «ЛОГОС», в том числе для подготовки и проведения связанных расчетов комплексных мультидисциплинарных задач математического моделирования.

В состав МИП входит Интегратор, который обеспечивает:

- копирование данных задач с локального компьютера на супер-ЭВМ;

 – постановка задач в очереди систем пакетной обработки (СПО)SLURM и JAM;

– получение статуса и управление запущенными задачами;

– передача результатов расчета задач с супер-ЭВМ на локальный компьютер пользователя.

Для решения поставленных задач в Интеграторе реализована подсистема взаимодействия с супер-ЭВМ, обеспечивающая:

 – передачу файлов между локальным компьютером и супер-ЭВМ с использованием протокола SFTP;

– постановку задач в очередь планировщика;

 – отслеживание статуса задачи и возможность отмены задачи на супер-ЭВМ с использованием протокола SSH;

– автоматическое формирование скриптов запуска расчетных математических методик под разные планировщики SLURM и JAM.

Подсистема взаимодействия с супер-ЭВМ

Разработанная подсистема взаимодействия с супер-ЭВМ позволяет использовать возможности протоколов SSH и SFTP для выполнения различных операций с файлами и каталогами между локальным компьютером пользователя и супер-ЭВМ, а также запуска задач в рамках проведения мультидисциплинарных вычислений на супер-ЭВМ.

SFTP – sshfiletransferprotocol (англ.) – протокол прикладного уровня, предназначенный для копирования и выполнения других операций с файлами поверх надежного и безопасного соединения [1].

SSH – secureshell (англ.) – сетевой протокол прикладного уровня, позволяющий производить удаленное управление операционной системой и туннелирование соединений [2]. Подсистема взаимодействия с супер-ЭВМ состоит из двух модулей:

- модуль удаленного доступа QtSsh;
- модуль удаленного запуска.

Модуль удаленного доступа QtSsh

Модуль QtSsh – программный модуль, созданный для работы с удаленной машиной (например, копирование файлов или запуск задач), используя возможности протоколов SSH и SFTP.

В процессе предоставления удаленного доступа к файловой системе супер-ЭВМ выполняются следующие действия:

- устанавливается ssh-соединение;

 осуществляется идентификация и аутентификация пользователя на удаленном компьютере;

- создается канал ssh-соединения;
- инициируется sftp-сессия;
- выполняется одна из следующих операций:

 копирование файлов / каталогов с локального компьютера на удаленный компьютер;

 копирование файлов / каталогов с удаленного компьютера на локальный компьютер;

– удаление файла / каталога;

 запуск расчетной задачи на удаленном компьютере.

- завершение sftp-сессии;
- закрытие канала ssh-соединения;

- завершение ssh-соединения.

Модуль QtSsh выполнен в виде отдельной динамической библиотеки и состоит из двух уровней:

– интерфейс взаимодействия динамической библиотеки с пользовательским приложением. Интерфейс разработан в виде C++ класса Ssh. В его задачи входит предоставить пользователю основные функции и скрыть детали реализации;

основная часть, реализующая функциональность библиотеки QtSsh, которая состоит из нескольких классов, реализует взаимодействие с функциями libssh [3].

Модуль удаленного запуска

Взаимодействие с системой управления расчетами на супер-ЭВМ осуществляется при помощи модуля удаленного запуска, который разработан с учетом использования различных систем пакетной



Рис. 1. Общая схема взаимодействия модуля удаленного запуска с использованием различных СПО

обработки заданий и обеспечивает следующее взаимодействие локального компьютера и супер-ЭВМ:

 автоматическое формирование скриптов пакетных заданий в зависимости от используемой системы управления заданиями и данных, предоставляемых пользователями;

 непосредственный запуск задачи на супер-ЭВМ (постановка задачи в очередь) с последующим формированием сигнальных файлов начала и завершения текущей задачи;

 отслеживание статуса запущенной задачи на всем протяжении ее выполнения с последующим возвратом кода состояния пользователю;

отмена задачи по требованию пользователя.

На рис. 1 представлена общая схема взаимодействия модуля удаленного запуска с использованием различных планировщиков заданий.

Модуль удаленного запуска состоит из двух программных компонент, обеспечивающих взаимодействие локального компьютера с супер-ЭВМ, с использованием протокола SSH:

– первая программная компонента – библиотека QJobStarter;

 вторая программная компонента – стартер запуска заданий с использованием различных планировщиков (SLURM и JAM).

Библиотека QJobStarter

Библиотека QJobStarter функционирует на локальном компьютере и предоставляет интерфейс выполнения команд для удаленного запуска заданий на супер-ЭВМ с помощью стартера.

Задание – это командный файл интерпретатора shell, который содержит информацию управления и резервирования вычислительных ресурсов. В задании обычно указывается сценарий (программа) запуска исполняемого модуля программы и название содержащего его файла.

Стартер – это программа постановки задачи в очередь планировщика заданий, получения статуса задачи, удаления задачи из очереди заданий.

Программный интерфейс библиотеки включает в себя следующий набор функций:

 функция авторизации удаленного соединения в соответствии с используемыми паролем и логином пользователя;

 функция выполнения запуска заданий на супер-ЭВМ с локального компьютера при помощи стартера;

 функции копирования файлов из / в рабочую директорию локального компьютера в / из рабочей директории супер-ЭВМ.

Стартер запуска заданий

Стартер запуска заданий состоит из двух программных компонент, обеспечивающих взаимодействие локального компьютера с супер-ЭВМ, с использованием протокола SSH:

 программная компонента поддержки планировщика SLURM;

программная компонента поддержки планировщика JAM.

Такая реализация стартера обусловлена несовместимостью команд планировщиков SLURM и JAM, а так же различными форматами данных выходной информации, предоставляемой этими планировщиками.

Данные программные компоненты обеспечивают взаимодействие пользователя с соответствующими планировщиками посредством удаленного выполнения их команд и предоставляют пользователю следующий набор функций: _Start() – осуществляет подготовку и запуск задания в пакетном режиме в соответствии с входной информацией, содержащейся в конфигурационном файле, предоставляемым пользователем. Обеспечивает запись информации о начале выполнения задания в соответствующий сигнальный файл;

 _Status() – обеспечивает отслеживание хода выполнения задания на всем протяжении времени счета с последующим возвратом статуса задания пользователю;

 _Cancel() – осуществляет принудительное завершение задания с последующей записью соответствующей информации в сигнальный файл.

Механизм реализации вызова данных функций осуществляется из командной строки стартера с помощью определенного набора команд и аргументов.

Формирование скрипта запуска и запуск задания

Подготовка скрипта запуска задания для соответствующего планировщика осуществляется автоматически на основе конфигурационного файла, предоставляемого пользователем и в соответствии с исходными параметрами задания.

На рис. 2 представлена структурная схема механизма формирования скрипта запуска для планировщиков SLURM и JAM на основе конфигурационного файла, предоставляемого пользователем.



Рис. 2. Механизм формирования скрипта запуска и запуск задания

Данный механизм состоит из трех основных этапов:

 этап 1 – загрузка конфигурационного скрипта в стартер;

 этап 2 – формирование скрипта запуска на основе информации, содержащейся в конфигурационном файле;

 этап 3 – постановка задачи в очередь на счет, с последующим возвращением кода завершенной операции стартеру.

При этом в обоих случаях сигнальный файл о начале хода выполнения задания будет сформирован только в случае фактического старта планировщиком соответствующего задания. На момент ожидания задания в очереди, файл не формируется стартером, так как фактически задание еще не запущено, а только ожидает выделения соответствующих ресурсов.

Отслеживание статуса исполняемой задачи

Отслеживание статуса исполняемой задачи может осуществляться пользователем на всем протяжении времени счета. При этом каждый раз после выполнения соответствующей команды пользователю будет возвращен код текущего состояния задания на основе информации, полученной от планировщика и в соответствие с его уникальным идентификатором.

На рис. 3 представлена структурная схема механизма мониторинга текущего состояния задания в процессе его работы в соответствие с его идентификатором для планировщиков SLURM и JAM.



Рис. 3. Механизм мониторинга текущего состояния задачи по ее идентификатору

В процессе запуска задания стартером создается файл, в котором хранится его уникальный идентификатор, присвоенный планировщиком. В данном случае стартер берет на себя функцию хранения идентификатора запущенной задачи в соответствующем файле для дальнейшего мониторинга состояния этой задачи в любой момент времени.

Удаление задачи из очереди

В процессе выполнения задания, помимо функции мониторинга пользователю предоставляется возможность принудительного завершения задания с последующей записью соответствующей информации в сигнальный файл. На рис. 4 представлена структурная схема механизма принудительного завершения задания в соответствии с его идентификатором.



Рис. 4. Механизм принудительного завершения задания по ее идентификатору

Как и в случае команды получения статуса исполняемого задания, данный механизм основывается на исполнении планировщиком соответствующей команды, в результате чего из очереди будет выбрано задание с идентификатором, хранящимся в файле (sjob.num или jamjob.num) и произведено удаление. В процессе удаления задания из очереди, стартером будет сформирован сигнальный файл, в котором будет записана соответствующая информация, а пользователю будет возвращен код соответствующей операции.

Заключение

В докладе описана организация взаимодействия Интегратора ЛОГОС-МИП с Супер-ЭВМ, которая обеспечивает Интегратор возможностью взаимодействия с Супер-ЭВМ для подготовки и расчета задач оптимизации и параметрических исследований распределено, с учетом особенностей инфраструктуры Супер-ЭВМ.

Литература

1. Протокол SFTP [Электронный ресурс]: Википедия – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/SFTP.

2. Протокол SSH [Электронный ресурс]: Википедия – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/SSH.

3. LibSSH – The SSH Library [Electronical resource]: www.libssh.org / Thelibssh team – Lausanne, Switzerland, [2017] – Mode of access: https://api.libssh.org/master/index.html.

ОТОБРАЖЕНИЕ АДАПТИВНЫХ ДАННЫХ МЕТОДИКИ КОРОНА В СИСТЕМЕ ПОСТОБРАБОТКИ SCIENTIFICVIEW

<u>П. А. Тюхтина</u>, Д. С. Кондратьев

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

Введение

Параллельная система постобработки ScientificView [1] предназначена для фильтрации, отображения, числового анализа результатов моделирования физических процессов на сетках регулярного и нерегулярного типа, а также для обработки данных, полученных безсеточными методами моделирования (частицы, молекулы, кластеры).

Методика КОРОНА – лагранжево – эйлеровая счетная методика, предназначенная для решения задач газовой динамики с переносом лучистой энергии. В расчетах по методике КОРОНА [2], [3] используется дробление некоторых ячеек расчетной сетки на подъячейки. Такие ячейки называются адаптивными. Дробление используется как для более точного учёта распространения веществ, так и для более точной аппроксимации элементов конструкции задачи. Каждая подъячейка обладает своими термодинамическими параметрами (координаты, температура, плотность, давление и т. д.). Топология разбиения адаптивной ячейки и значения термодинамических величин сохраняются в файл формата ЕФР [4], содержащий разрез модели.

В представленной работе, в рамках параллельной системы постобработки ScientificView обеспечена обработка адаптивных 2D данных методики КО-РОНА, а именно:

- отображение адаптивных данных;

 – получение информации по конкретным выбранным пользователем адаптивным ячейкам или узлам сетки (далее элементам сетки).

Выбор элементов сетки (далее пикинг) осуществляется с помощью интерактивной обработки событий мыши.

Возможность отображать адаптивные данные и получать информацию по конкретной адаптивной ячейке позволяет анализировать детальное распределение веществ, и как следствие, совершенствовать аппарат работы с ними и рассчитывать новые задачи на очень подробных пространственных сетках. Описанные возможности реализованы как в скалярном режиме работы, так и в параллельном.

Обеспечение отображения 2D адаптивных данных методики КОРОНА

Чтобы обеспечить отображение адаптивных данных методики КОРОНА потребовалось дорабо-

тать существующие методы отображения двумерных обычных и адаптивных сеточных данных, содержащих адаптивные элементы нового типа. Для этого потребовалось:

 – создать новые методы для чтения и разбора адаптивных списков;

 – получить необходимую для отображения информацию об элементе сетки;

 – для элемента сетки инициализировать и заполнить класс хранения полной информации;

 – сформировать контейнер хранения адаптивных данных.

После заполнения контейнера адаптивных данных подсистема рендеринга ScientificView сама отображает эти данные в графическом окне.

Ниже представлен результат работы в части отображения 2D адаптивных данных методики КОРОНА рис. 1.



Рис. 1. Отображение 2D-адаптивной сетки методики: а – без использования написанного алгоритма, б – с использованием написанного алгоритма

Получение информации о выделенном элементе

Для того чтобы обеспечить получение информации о выделенном элементе, потребовалось доработать следующие алгоритмы:

- выбор элементов сетки средствами пикинга;

подсветка выбранного с помощью пикинга
 элемента сетки;

– получение свойств выбранного элемента сетки;

 вывод свойств выбранного элемента сетки в графическое окно.

Рассмотрим вышеперечисленные пункты подробнее.

Пикинг

В ScientificView выбор элементов осуществляется с помощью функции gluPickMatrix [2], которая, основываясь только на экранных координатах и заданных размерах пикселей, создаёт матрицу, используемую для формирования необходимого наблюдательного объема, расположенного под курсором мыши. На основе наблюдаемого объема формируется буфер выбора.

Авторами доклада была проведена адаптация методов заполнения буфера выбора в соответствие с новым типом адаптивных элементов (адаптивные 2D ячейки или узлы методики КОРОНА).

Маркировка выбранного с помощью пикинга элемента сетки

Для того чтобы подсветить выбранный средствами пикинга элемент сетки, потребовалось следующее:

 проанализировать буфер выбора и понять присутствуют ли там элементы нового типа, а именно адаптивные 2D ячейки или узлы методики КОРОНА;

 извлечь информацию об элементе сетки и занести в специальный класс хранения информации о выбранном элементе;

 адаптировать метод графического отображения выбранного элемента сетки, который использует класс хранения информации о выбранном элементе.

На рис. 2 представлен результат отображения выбранной с помощью пикинга ячейки сетки методики КОРОНА.





На рис. 3 представлен результат отображения выбранного с помощью пикинга узла сетки методики КОРОНА.



Рис. 3. Результат выбранного пользователем с помощью пикинга узла сетки методики КОРОНА: а – без использования написанного алгоритма, б – с использованием написанного алгоритма

Получение свойств выбранного элемента сетки

Специально для получения свойств выбранного элемента сетки был реализован ряд функций с целью:

 – поиска необходимого элемента в контейнере адаптивных ячеек;

 чтения структур хранения адаптивных данных;

На рис. 4 представлена упрощенная схема взаимодествия диалогов пользователя с объектом двумерная математическая область.



Рис. 4. Схема получения информации о выделенном элементе

Вывод свойств выбранного элемента сетки в диалоговое окно

Чтобы обеспечить вывод данных о выбранноя ячейке/узлев диалоговое окноинформации о выделенном элементе, потребовалась доработка ряда методов этого диалога. Результат работы представлен на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Результат вывода в диалоговое окно «Информация о выбранном элементе»: а – об адаптивной ячейке, б – об адаптивном узле

Распараллеливание созданного алгоритма обработки адаптивных 2D данных методики КОРОНА

Для того чтобы выше представленный алгоритм работал в параллельном режиме, необходимо обеспечить работу как на этапе отображения так и на этапе получения информации о выбранном элементе. Ниже представлена упрощенная схема передачи сообщений от элементов управления диалога интерфейса пользователя к объекту двумерной математической области на серверной стороне рис. 6.



Рис. 6. Общая схема работы алгоритма в параллельном режиме

При получении величин выбранного элемента, все данные хранятся на серверной стороне, а величины нам нужно получить на клиентской стороне, поэтому перед выводом полученных на сервере данных, нужно отправить запрос на сервер.

Сложность реализации алгоритма была в отделении процессов, не предусматривающих обработку адаптивных данных, от процессов, содержащих обработку адаптивных, но не обрабатывающих информацию о выбранных пользователем элементах.

Результаты обработки двумерных адаптивных данных методики КОРОНА в ScientificView

После загрузки файла содержащего регулярные данные осуществляется их отображение. На рис. 7 представлено отображение 2Д адаптивных данных размерностью 432 ячейки.



Рис. 7. Отображение сетки 2Д адаптивных данных. Размерность задачи 3 тысячи ячеек



Рис. 8. Отображение сетки 2Д адаптивных данных. Размерность задачи 500 тысяч ячеек

Заключение

В результате поддержки в программе ScientificView возможности обработки 2D адаптивных данных методики КОРОНА стало доступным:

 – графическое отображение 2D адаптивных данных методики КОРОНА;

 – получение информации о выбранном с помощью пикинга элементе сетки;

 – обработка задач с большим количеством элементов сетки.

Заметим, что для обеспечения обработки нового типа адаптивных данных в программе ScientificView были доработаны более десяти классов которые содержат в общей сложности более 20 методов. Было написано 15 новых методов для этих классов. Объем кода составил около 3000 строк.

Литература

1. Потехин А. Л., Тарасов В. И., Фирсов С. А., Логинов И. В., Никитин В. А., Кузнецов М. Ю., Попова Н. В., Деманова А. К., Козачек Ю. В. «ScientificView – параллельная система постобработки результатов, полученных при численном моделировании физических процессов», ВАНТ, Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2008 – Вып. 4, С37–45.

2. Ляпин В. В., Королев Р. А., Ветчинников А. В., «Метод распараллеливания с применением двумерной декомпозиции расчетной сетки для численного решения двумерного уравнения теплопроводности по методике КОРОНА-2D»: ВАНТ. 2014. Вып.2.С. 69–77.

3. 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» // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2007 – Вып. 1.

4. Райт Р. С., Липчак Б. OpenGlcyперкнига. – М.: Вильямс, 2006.

5. Волгин А. В. «Библиотека ЕФР для универсального представления расчётных данных» // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Выпуск 11. 2007. С. 130–135.

6. Олесницкая К. К., Антипин И. А., Петрова М. А. «Библиотека ЕФР как средство эффективного доступа к файловым данным на гибридных вычислительных системах и суперкомпьютерах» // XV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: Сборник тезисов. Саров, 13–17 октября, 2014. С. 103.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ СТРАУС-2, ИЛТИ-1 №1, №2

<u>Д. А. Хлопков</u>, А. Д. Воронова, Т. К. Шмелькова, А. В. Осадчих

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

Введение

Ускорители электронов СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1. №2 [1, 2] входят в состав электрофизических установок облучательного комплекса ПУЛЬСАР и предназначены для моделирования в лабораторных условиях воздействия ионизирующего излучения на технические устройства и материалы с целью проверки их радиационной стойкости и проведения исследований в области радиационной физики. Система управления и контроля ускорителейСТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1, № 2 была разработана и введена в эксплуатацию в 1998г. Она создана для дистанционного централизованного управления и контроля входящих в состав ускорителей объектов, размещенных в нескольких помещениях, представления информации о состоянии этих объектов и контроля достижения в них заданных значений параметров. Ядром системы управления и контроля являлась измерительная и управляющая аппаратура, построенная в стандарте КАМАК (аналого-цифровые преобразователи, мультиплексоры, входные и выходные регистры). Алгоритм работы был реализован с помощью только электроники. Настройка конфигурации автоматизированной системы управления и контроля (АСУК) осуществлялась с помощью тумблеров и переключателей электронных блоков управления.

Со временем оборудование, входящее в состав АСУК ускорителей СТРАУС-2,

ИЛТИ-1 № 1, № 2, морально и физически устарело. Многие элементы, необходимые для ремонта, сняты с производства. В связи с вышеперечисленным, а также стремительным ростом возможностей современной техники была выполнена работа по созданию новых АСУК ускорителейСТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1, № 2.Функции управления и контроля реализованы комплексно на основе современной элементной базы и современного программного обеспечения. На рис. 1 изображен ускоритель СТРАУС-2.

Объекты автоматизации ускорителя СТРАУС-2 и ускорителей ИЛТИ-1 № 1, № 2 аналогичны, поэтому разработанное программное обеспечение (ПО) для них схоже по алгоритму, принципу работы и реализации. В данном докладе подробно представлено ПО АСУК ускорителя СТРАУС-2.

Ускоритель СТРАУС-2 включает в себя следующие узлы, требующие контроля и/или управления:

• импульсное зарядное устройство двойной ступенчатой формирующей линии; • высоковольтная система синхронизации (ВСС);

• технологическое оборудование, в частности высоковольтные зарядные устройства (ВЗУ).



Рис. 1. Ускоритель СТРАУС-2

В этих узлах с помощью АСУК осуществляется:

 контроль зарядного напряжения на емкостных накопителях двух генераторов импульсного напряжения (ГИН) типа ГИН-600 и двух типа ГИН-100А;

 управление коммутацией высоковольтных переключателей на основе электромагнитов МИС, подключающих соответствующие генераторы к источнику напряжения, и контроль их состояния;

• управление тремя ВЗУ с контролем выходных тока и напряжения;

• управление включением питания двух блочных импульсных наносекундных генераторов (БИНГ) типа БИНГ-5, БИНГ-6, контроль их зарядного напряжения и запуск.

Всего насчитывается десять объектов, для автоматизации работы которых необходимо около 50 каналов управления, контроля и передачи данных.

Для унификации с АСУК установки ЛИУ-30, успешно проверенной на практике, АСУК ускорителя СТРАУС-2 выполнена в виде аппаратнопрограммного комплекса, основанного на использовании устройств управления, сбора и обработки информации фирм National Instruments и ADLink. Структурная схема АСУК с объектами автоматизации ускорителя СТРАУС-2 [3] приведена на рис. 2. Элементы АСУК выделены сплошными линиями.

Аппаратные средства АСУК ускорителя СТРА-УС-2 включают:

• персональный компьютер, системный блок которого содержит платы для организации 23 входных цифровых каналов (PCI-7433) под команды контроля, 15 выходных цифровых каналов (PCI-7434) под команды управления, 2 выходных (для управления зарядкой B3У) и 8 входных аналоговых каналов (NIUSB-6255) для передачи данных;

• монитор для вывода информации, клавиатура, мышь для связи оператора с ПК;

• стойку с электронными блоками.

АСУК ускорителя СТРАУС-2 выполняет следующие функции:

• реализация схемы подключения к выпрямительно-зарядным устройствам емкостных накопителей генераторов типа БИНГ и ГИН в соответствии с редакцией эксперимента;

 управление зарядкой выбранных емкостных накопителей до заданного напряжения за определенное время при выполнении работ по текущей эксплуатации, подготовке и проведению рабочего пуска;

• контроль электрических параметров устройств статической зарядки емкостных накопителей;

визуализация контролируемых параметров;

• сохранение контролируемых параметров в базе данных;

• формирование и подача низковольтного сигнала запуска на стартовые генераторы БИНГ-5 ускорителя СТРАУС-2;

контроль состояния дверей технологических помещений;

 обеспечение безопасности и надежности эксплуатации ускорителя СТРАУС-2 за счет автоматического обнаружения отклонений контролируемых параметров от штатных;

 осуществление защиты персонала с помощью экстренного сброса высокого напряжения в процессе зарядки ГИН на разрядные сопротивления:

 при поступлении сигнала несанкционированного доступа от концевых выключателей на входных дверях в контролируемых помещениях;

 при нажатии на кнопку «сброс» на пульте управления;

- при нажатии на кнопку «аварийный сброс».

ПО является составной частью АСУК ускорителя СТРАУС-2. ПО создано в графической среде Lab-VIEW – Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) (Среда разработки лабораторных виртуальных приборов) фирмы National Instruments [4].

ПО представляет собой среду графического программирования, которое широко используется в промышленности, образовании и научно-исследо-



Рис. 2. Структурная схема АСУК с объектами автоматизации



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы программы

вательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами. На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма работы программы.

В программе реализовано четыре режима работы: «Конфигурация», «Зарядка», «Имитация зарядки», «График».

Интерфейс главного окна программы представлен на рис. 4.



Рис. 4. Интерфейс главного окна программы

Режим «Конфигурация» инициализируется нажатием на пиктограмму кнопки «конфигурация». При этом происходит загрузка программного модуля выбора или задание конфигурации устройств ускорителя СТРАУС-2. Интерфейс программного модуля «Конфигурация» представлен на рис. 5.



Рис. 5. Интерфейс программного модуля «Конфигурация»

Есть два способа работы в программном модуле «Конфигурация».

В первом варианте можно загрузить сохраненную в файле конфигурацию. При этом автоматически заполняются текстовые поля «НАПРЯЖЕНИЕ ВЗУ», «ВРЕМЯ ЗАРЯДКИ», «ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ» и значения напряжений на индикаторах тех ГИН, которые выбраны для участия в эксперименте.

Второй вариант – создать новую конфигурацию. Для этого необходимо задать значения в текстовых полях «НАПРЯЖЕНИЕ ВЗУ», «ВРЕМЯ ЗАРЯДКИ», «ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ» и выбрать те ГИН, которые будут участвовать в эксперименте, нажав на кнопки, расположенные под индикаторами ГИН.

Программный модуль управления и контроля ходом зарядки устройств ускорителя СТРАУС-2 загружается по нажатию в главном окне программы кнопки «зарядка». Интерфейс программного модуля «Зарядка» представлен на рис. 6.



Рис. 6. Интерфейс программного модуля «Зарядка»

Необходимо убедиться, что в информационном поле «<u>ДВЕРЬСЕТЬ</u>» лампы свидетелей горят ярко зеленым цветом. Программируемый генератор сигналов (ПГС) переводится в режим «ожидание пуска»нажатием в поле «ПГС» зеленой кнопки «ВКЛ».

Далее включается питание ВЗУ 100 и/или ВЗУ 600 кнопкой «ВКЛ» в поле «<u>ПИТАНИЕ</u>». При этом загорается соответствующая красная лампасвидетель включения питания над полем «<u>ПИТА-НИЕ</u>» и лампа-индикатор «Закоротка выхода ВЗУ 100» и/или «Закоротка выхода ВЗУ 600».

На втором этапе, при условии успешного включения питания, нажатием кнопки «ВКЛ» в поле «<u>ВЫСОКОЕ</u>» включается высокое напряжение ВЗУ 100 и/или ВЗУ 600 и загораются соответствующие красные лампы-свидетели включения над полем «<u>ВЫСОКОЕ</u>». Происходит замыкание необходимых контактов для работы ускорителя СТРАУС-2. Загораются лампы-индикаторы подключения выбранных для участия в эксперименте генераторов.

На третьем этапе, при условии успешного включения высокого, активизируется процесс зарядки ВЗУ нажатием кнопки «ВКЛ» в поле «<u>ЗАРЯДКА</u>». Загораются соответствующие лампы-индикаторы. В полях «ТЕКУЩЕЕ ВРЕМЯ ЗАРЯДКИ» и «ОБ-РАТНЫЙ ОТСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАРЯДКИ» стартует прямой и обратный отсчёт времени. В полях ВЗУ 100 и ВЗУ 600 отображается процесс изменения напряжения соответствующих ВЗУ и генераторов импульсного напряжения.

За определенное время до окончания зарядки автоматически включается питание стойки БИНГ. В поле «Включение стойки БИНГ» загораются оранжевая кнопка и зеленая лампочка свидетеля включения питания. Кроме того, включить и выключить питание стойки можно вручную, нажав на кнопку. По завершению зарядки генераторов до нужных значений подается сигнал нажатием кнопки «ПУСК». После выполнения команды загорается соответствующая лампа-индикатор.

При возникновении внештатной ситуации необходимо нажать кнопку «СБРОС». Это приводит к размыканию контактов, остановке процесса зарядки, сбросу накопленной энергии на разрядные резисторы, отключению высокого напряжения и питания ВЗУ, остановке запущенной задачи генерации сигнала на плате NIUSB-6255, обнулению регистров плат ADLinkPCI-7434, PCI-7433.

Режим «Имитация зарядки» предназначен для просмотра завершенного процесса зарядки устройств ускорителя СТРАУС-2. Интерфейс программного модуля «Имитация зарядки» представлен на рис.7.



Рис. 7.Интерфейс программного модуля «Имитация зарядки»

С помощью кнопки «Загрузка из файла» осуществляется выбор сохраненного ранее файла с данными для имитации процесса зарядки устройств ускорителя СТРАУС-2. Имя файла содержит время его создания.

Нажатие кнопки «Загрузка из файла» вызывает файловый диалог, в котором оператору предлагается выбрать файл из набора. Вид окна выбора файла для имитации процесса зарядки представлен на рис. 8.

Выберите файл	зарядки			?X
Палка:	PistoryOfCharge	*	0000	
Недовние докунонты Рабочий стол Оби докуленты Мок компьютер С	Masurement Apase 03,04,2018 9,52,55 03,04,2018 9,024,1 03,04,2018 10,22,1 03,04,2018 10,22,1 03,04,2018 10,22,1 03,04,2018 10,22,1 03,04,2018 10,22,1 03,04,2018 11,24,2 04,03,2018 14,02,2 04,03,2018 14,02,2 04,03,2018 14,02,1 04,03,2018 14,02,1 06,03,2018 14,10,2 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 04,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 04,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 04,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 04,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 06,03,2018 14,02,0 06,03,2018 14,02,0 06,03,2018 14,02,0 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 13,10,3 06,03,2018 14,02,0 06,03,2018 14,02,0 06,03,000,000,000,000,000,000,000,000,00	06_04_2018 10_07_35 108_03_2018 10_51_13 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_52 128_03_2018 10_02_40 128_03_2018 10_02_40 128_03_2018 10_02_40 128_03_2018 10_03_33 128_03_2018 10_03_33 128_03_2018 10_03_33 128_03_2018 10_03_33 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_30_38 128_03_2018 10_40_35 128_03_2018 10_40_35 128_03_2018 10_40_35 128_03_2018 10_40_35 128_20_3_2018 10_45_35 <	29_03_2018 14_53_51	
Сетевое окружение	Иня файла:		¥	ОК
	Тип файла: Cust	om Pattern (".txl)	v (тмена

Рис. 8. Окно выбора файла для имитации процесса зарядки

После выбора файла открывается интерфейс программного модуля «Имитация зарядки» с заполненными полями «Заданное U ВЗУ» для ВЗУ 600 и ВЗУ 100 и «Заданное время зарядки», начинается имитация процесса зарядки устройств ускорителя, стартует отсчет времени в поле «ТЕКУЩЕЕ ВРЕМЯ ЗАРЯДКИ».

Остановка просмотра имитации процесса зарядки осуществляется с помощью кнопки «СТОП».

При нажатии в главном окне программы кнопки «график» происходит загрузка программного модуля просмотра осциллограмм, построенных с использованием данных, сохраненных в файле. Интерфейс программного модуля «График» представлен на рис. 9.



Рис. 9.Интерфейс программного модуля «График»

Нажав на кнопку «Загрузка из файла» можно выбрать и вывести на экран осциллограммы из сохраненного ранее файла.

Все графики изменения напряжения во времени по данным, записанным в файле в ходе эксперимента, отображаются в окне «Все каналы».

Для просмотра графиков одного или нескольких устройств ускорителя используются кнопки выбора каналов ВЗУ 600, ВЗУ 100, U, БИНГ, I. В окне «Выбранные каналы» выводятся графики изменения напряжения во времени на одном или нескольких устройствах ускорителя, которые выбраны с помощью кнопок. Вертикальная ось – напряжение в киловольтах, горизонтальная ось – время в секундах.

В заключение стоит отметить, что использование программного обеспечения позволило оптимизировать реализацию алгоритма работы АСУК, минимизировать набор технических средств и уменьшить степень участия оператора в управлении их работой.

ПО АСУК ускорителей предполагает развитие – реализацию автоматической подачи команд и контроля их выполнения от старта до пуска. Кроме того, планируется разработать ПО для обеспечения совместного запуска ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1, № 2 и ЛИУ-30 в соответствии с заданной временной диаграммой.

Литература

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко А. В. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергии: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011. С.165-191.

2. Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Гришин А. В., Завьялов Н. В., Мысков Г. А., Назаренко С. Т. Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Выпуск 20. 2015.

3. Босамыкин В. С., Гордеев В. С., Павловский А. И. и др. Импульсный ускоритель электронов СТРАУС-2 // Физика и техника высоких плотностей электромагнитной энергии. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2003. С. 69-102.

4. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования. Пер. с англ. под ред. Михеева П. М.: ДМК Пресс. 2012. С.400.

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ «ПАКТ 2.0»

<u>Н. В. Цепцова</u>, Е. А. Осипова, А. О. Серова

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

Введение

Применение и развитие измерительной техники всегда было обусловлено потребностями производства, торговли и других сфер человеческой деятельности. Контрольно-измерительные операции давно стали неотъемлемой частью технологических процессов и в значительной степени определяют качество выпускаемой продукции. Прогресс измерительной техники неразрывно связан с научно-техническим прогрессом. Новые научные и технические задачи приводят и к новым измерительным задачам, для которых нужны новые средства измерений.

Информационно измерительные системы (ИИС) являются симбиозом аппаратных средств и алгоритмов обработки измерительной информации. При этом, благодаря наличию в составе ИИС ЭВМ, возможна дальнейшая обработка результатов измерений, полученных путем обработки первичной измерительной информации. Это позволяет решать с помощью ИИС широкий спектр других задач, не являющихся чисто измерительными, например, контроль качества и др. Системы автоматического контроля являются одной из разновидностей ИИС.

Для решения задач автоматизации контрольных операций и сокращения времени на проверку приборов в нашем подразделении был разработан комплекс программ автоматизированного контроля и тестирования (ПАКТ). В настоящее время ПАКТ успешно применяется для проверки приборов автоматики и пультовой аппаратуры.

В докладе приведены результаты модернизации программного комплекса «ПАКТ 2.0», обеспечивающие его работу в современных операционных системах (ОС), таких как GNU/Linux, MS Windows 7, 10. «ПАКТ 2.0» соответствует требованиям ГОСТ Р 8.654-2015 [1] к структуре и идентификации программного обеспечения. В докладе представлена обновленная структура программного комплекса, его основные зависимости и характеристики. Описаны новые возможности «ПАКТ 2.0», обеспечивающие надёжность и удобство использования программы пользователем.

Задачи, решаемые программным комплексом «ПАКТ 2.0»

«ПАКТ 2.0» – комплекс программных средств, позволяющий проводить проверку объекта контроля (ОК) в автоматическом режиме.

Главной задачей данного комплекса является снижение доли участия человека в процессе контроля измерительной и пультовой аппаратуры. Наряду с этим комплекс решает следующие задачи:

 удалённое управление измерительной аппаратурой;

проведение экспериментов;

- сбор и обработка данных;

- принятие решения о годности ОК;

простой унифицированный пользовательский интерфейс;

- единый вид протокола проверки;

проверка целостности программного обеспечения (ПО).

Работа «ПАКТ 2.0» основана на принципах кроссплатформенности, модульности, переносимости и многозадачности.

Архитектура программного комплекса «ПАКТ 2.0»

«ПАКТ 2.0» представляет собой модульное клиент-серверное приложение, использующее вебтехнологии для взаимодействия с пользователем. Организация пользовательского интерфейса комплекса в виде веб-приложения позволяет добиться максимальной кроссплатформенности.

Ранее для работы «ПАКТ» было необходимо, чтобы на персональный компьютер была установлена 32-разрядная версия ОС Windows XP. Модернизация программного комплекса позволила перевести программу на работу в современных операционных системах, таких как GNU/Linux, MS Windows 7, 10 [2].

«ПАКТ 2.0» имеет модульную структуру, что позволяет разделить ПО на метрологически значимую и метрологически незначимую части для соответствия ГОСТ Р 8.654-2015. «ПАКТ 2.0» включает в себя следующие модули:

 модуль «Пользовательский интерфейс» – вебприложение, которое отвечает за ввод информации для начала проверки и представление результатов контроля;

 модуль «Окно» – приложение для формирования основного окна ПАКТ, служит для загрузки пользовательского интерфейса (замена браузера Chrome);

 – модуль «Защищенный интерфейс» – программный модуль, реализующий протокол обмена данными между метрологически значимыми и метрологически незначимыми модулями комплекса; модуль «Управление», метрологически значимый программный модуль, реализующий функции веб-сервера и программы запуска проверки подлинности ПО с помощью модуля «Идентификатор»;

– модуль «Методика» – метрологически значимый программный модуль, реализующий методику проверки ОК, содержит программный код для проведения экспериментов, обработки экспериментальных данных, контроля вхождения в нормы. Модуль меняется в зависимости от ОК и методики проверки.

Схема взаимодействия модулей «ПАКТ 2.0» представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема взаимодействия модулей «ПАКТ 2.0»

Загрузка «ПАКТ 2.0» начинается с запуска программного модуля «Окно». Модуль «Окно» запускает веб-сервер, а также запрашивает стартовую страницу пользовательского интерфейса у модуля «Управление», после чего начинается загрузка модуля «Пользовательский интерфейс». Модуль «Управление» проверяет подлинность и целостность метрологически значимой части ПО с помошью модуля «Идентификатор» и загружает модуль «Методика». «Пользовательский интерфейс» устанавливает связь с модулем «Управление» через модуль «Защищенный интерфейс». Модули «Идентификатор» и «Защищенный интерфейс» введены в состав «ПАКТ 2.0» для соответствия требованиям ГОСТ Р 8.654-2015 и защищают метрологически значимые данные от преднамеренного или случайного изменения.

Модуль «Окно»

Программный комплекс «ПАКТ 2.0» использует веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем. Для его представления в предыдущей версии использовался веб-браузер Google Chrome. Функциональные возможности веб-браузера избыточны для проверки ОК (нет необходимости в использовании строки ввода адреса, кнопок переходов, журналов посещений, плагинов и прочее). Все что нужно – это только механизм отрисовки документов HTML, поддержка CSS и JavaScript. В «ПАКТ 2.0» вместо веббраузера используется программный комплекс Electron, который уже включает в себя минимальную версию веб-браузера Chromium. Так как разрабатываемое ПО должно располагаться на клиентской машине и должно предоставлять привычный интерфейс для взаимодействия, было принято решение выделить Electron со специально разработанным сценарием запуска внешних приложений и системой конфигурации внешнего вида в отдельный программный модуль. Это позволяет использовать данный модуль в других проектах.

Модуль «Окно» представляет собой независимую программу-оболочку для отображения различных веб-документов. Согласно ГОСТ Р 8.654-2015, он не является метрологически значимым ПО и не подлежит обязательной аттестации.

Модуль «Окно» предназначен для отображения текстовых документов, выполненных на языке НТМL, предоставляет возможности выбора адреса отображаемого документа перед запуском программы, запуска внешней программы (например, вебсервера) перед загрузкой НТМL-документа. Вид главного окна программного модуля «Окно» представлен на рис. 2.



Рис. 2. Визуальное представление модуля «Окно»

Программа разработана в среде программирования Electron с использованием языка программирования JavaScript.

Программа «Окно» состоит из двух составных частей:

программный комплекс Electron;

модуль управления окном.

Программный комплекс Electron – свободное ПО, позволяет создавать кроссплатформенные приложения с использованием веб-технологий, таких как HTML, CSS, JS. Electron включает в себя Node.js и Chromium [3]. Node.js – интерпретированный язык программирования, построенный на основе JavaScript, добавляет возможность JavaScript взаимодействовать с устройствами ввода-вывода через свой API, подключать внешние библиотеки, написанные на разных языках, обеспечивая вызовы к ним из JavaScript-кода. Chromium – минимальная версия веб-браузера, контролируемого JavaScript.

Модуль управления окном содержит файлы, необходимые для работы приложения: «package.json» выполняется при старте приложения, содержит основную информацию о проекте (версия, название, точка входа и т. д.);

 «main.js» – точка входа приложения, содержит скрипт для открытия окна приложения, определяет некоторые параметры и обработчики событий;

- «config.json» – файл конфигурации;

 – файлы отображаемых HTML-документов и исполняемые файлы загружаемых внешних программ (при необходимости).

Файл конфигурации «config.json» содержит параметры открытия окна браузера, наименование загружаемых документов и запускаемых внешних программ. Он представляет собой текстовый документ в формате JSON, конфигурация представлена в виде словаря «ключ-значение».

Модуль «Пользовательский интерфейс»

Программный модуль «Пользовательский интерфейс» отвечает за предоставление оператору органов управления программой и представление результатов проверки. Как и в предыдущей версии «ПАКТ», пользовательский интерфейс реализован в виде веб-приложения. Применение веб-технологий обеспечивает максимальную кроссплатформенность и широкие возможности для формирования элементов пользовательского интерфейса.

На рис. 3 приведён внешний вид формы для ввода данных в программу.

KTIM28 KCAR 1 0 Kana K.O. ongostopa Kaston Anton Kaston A		
икима М.О. онератора (разова Антон Мат Контриля Водпульный прибор 		DK1TM28
іраком Антон мат кантрики Бартуланный прибор Nr ородо ород праверки Траняльсдалонные испитания в кормальных илиматических условики при U+208 тимитарии		амялия И.О. оператора
ная контроля Востульный прибор 		Кузяйн Антон
внутульный прибор . Nr осноб] - проведкая - примандатичные испытания в нермальных климатических условиях при U+200 - менятария		65ast sourpoins
. № 00-00[а проверке Прависидаточные испытания в исрикальных хлиматических условиях при U+208 ментарии		Виртуальный прибор
ор-оф 1 превреке Приевосдиточные испитания в кормалиных илинатических условитя при U+208 иментарии		an. No
а проверки Триевосдаточные испитания в нермалиных клинатических условиях при U+208 иментарии		000-00[
Оневисалление и слигания в нормальных клинатических условиях при U+208 иментарии		ид проверки
иментарии		Приемосдаточные испытания в нормальных климатических усповиях при U+208
		омментарии
	CTADT D	

Рис. 3. Форма ввода данных в программу

Форма позволяет выбрать ОК, вид проверки, указать заводской номер проверяемого устройства, ввести имя оператора. Данная информация характеризует проверку и отражается в итоговом протоколе.

На рис. 4 приведен внешний вид программы в ходе проверки. Протокол доступен сразу после за-

пуска проверки и заполняется программой по мере поступления информации от модуля «Методика». В отличие от предыдущей версии «ПАКТ», где протокол формировался на стадии выполнения проверки с помощью специальных функций и классов, требовал отдельной отладки и проверки, в новой версии протокол верстается полностью на языке HTML и может быть проверен в любом веб-браузере или даже в программе MS Word. Места отображения контролируемых параметров обозначаются специальными атрибутами в разметке документа. Такая организация позволяет на ранних стадиях разработки согласовать и утвердить внешний вид разрабатываемой программы, определить перечень контролируемых параметров и их место в протоколе.

Протокол состоит из трех основных частей: шапка протокола, поле вывода сообщений и таблица результатов.

colui	et accertace to		Bephänessall tradico					
	ratio antern		200.00			20.98		
Bet 1			Description and a chartered a	solutions then	structure of transition story (2)	-208		
_					a sour (count of the c			
_				Roman Arrow		13.96.2010		
-								
	Trades Nert' To	ert 21 Barrisch tal	marthurs from Cit 7 stansing 1					
And Table 1811 1811 4 1. See but any set of the set of a particular								
Sampuani seci 1 Terr 20. Roimpans napametpon time DX 2 kawata 1								
Togsamp 16/2 + 2 0000196								
	Trapawerg fed3 = 1 6e 7							
Параметр 4625 + 1 6+ 7								
Thepsentry Sec34 - 0 20000014								
-								
	CONTRACTOR OF CLASS	111.10.10540						
		First of the local		-	-	Person appropriate		
	citati ti	Koncella gene	Consideration opposition	- the second sec		Pporpassa MX	01 02	
*			Use #	21.0 x 0.2	19.783858			
		++THTANK:+	Unve B	21.0 + 0.2	18.783218			
H 1 2 3	124	+#TMTANIE>	Unut II Unut II	21.0 x 0.2	19.783218			

Рис. 4. Внешний вид протокола проверки

Шапка протокола содержит информацию о проверяемом объекте и операторе. Так же во время проверки в шапке отображается полоса прогресса и кнопка «Стоп». Кнопка «Стоп» позволяет прекратить проверку в случае необходимости.

Поле вывода сообщений отображает информационные сообщения, полученные от модуля методика в ходе выполнения проверки. В поле выводится такая информация, как: начало проверки, начало выполнения теста, начало выполнения эксперимента, значение параметра.

Таблица результатов предназначена для структурированного представления результатов проверки.

На рис. 5 приведён вид протокола после завершения проверки. В пользовательском интерфейсе вместо полосы прогресса выводится результат контроля. Скрыта кнопка «Стоп» и поле вывода сообщений.

Данный вид протокола доступен для печати.

ОК1ПМ28

ВЕРСИЯ 1.0

Объект контроля	Виртуальный прибор	10.00
Заводской номер	000-00	годен
Вид проверки	Приемосдаточные испытания в нормальных	к климатических условиях при U=20B
Коментарии		

Кузякин Антон

13.06.2018

Nº	DVUVT TV	Іункт ТУ Команда,цепь		Норма	Измерение	Режим измерения			
N	Пункі ГУ		Обозначение параметра	порма		Программа МК	G1	G2	
1		«±ПИТАНИЕ» 2.4 «±НП»	U _{пит} , В	21.0 ± 0.2	20.9				
2			U _{пит} , В	21.0 ± 0.2	20.9				
3	1.2.4		U _{пит} , В	21.0 ± 0.2	20.9				
4			U _{HII} , B	23.0 ± 0.2	23.1				
5			U _{HI} , B	23.0 ± 0.2	23.1				
6	1.2.3	«±НП»	t _{FOT} , c	1.0, не более	0.5				
7	1.2.5		I _{HII} , A	0.30, не более	0.18				
8	1.2.5		I _{ВКЛ} , А	3.5, не более	3.0				
9	1.2.3		t _{rot} , c	1.0, не более	0.5				
10	1.2.5	«±ПИТАНИЕ»	Іпит, А	0.30, не более	0.15				
11	1.2.5		І _{ут} , мкА	50.0 не более	34.3				

Рис. 5. Внешний вид программы после завершения проверки

Модуль «Методика»

С каждым годом количество разработанных и внедрённых программ автоматизированного контроля растет, на первый план выходят задачи сопровождения и метрологической аттестации. С целью систематизации накопленного опыта, упрощения процесса разработки и сопровождения, обеспечения надлежащего уровня документации разработана единая методика создания программ автоматизированного контроля [5].

Модуль «Методика» решает множество задач, непосредственно связанных с автоматизированной проверкой ОК (настройка измерительной аппаратуры, проведение экспериментов и тестов, обработка данных) и таким образом является метрологически значимой частью «ПАКТ 2.0», подлежащей обязательной метрологической аттестации согласно СТО A 4523-2014 [6].

Модуль «Методика» имеет унифицированную структуру программного каталога, что обеспечивает быструю навигацию внутри модуля, ее определенность позволяет нескольким разработчикам поддерживать код.

Модуль «Защищенный интерфейс»

Для реализации требований ГОСТ Р 8.654-2015 в части организации взаимодействия между метрологически значимыми и незначимыми частями ПО разработан модуль «Защищенный интерфейс».

Защищенный интерфейс – это интерфейс, через который может быть передан или изменен только определенный набор данных и параметров. Через

защищенный интерфейс невозможно ввести в ПО данные, которые могут быть ошибочно приняты за результат измерения, а также команды, которые могут быть использованы для искажения отображаемых, обработанных и сохраненных результатов измерения или других данных либо для несанкционированного изменения настроек ПО.

Программный модуль состоит из трех частей:

- Объект «Защищенный интерфейс. Клиент»;

- Объект «Защищенный интерфейс. Сервер»;

- Библиотека SocketIO.

Библиотека SocketIO – отвечает за передачу данных в реальном времени между модулями «Пользовательский интерфейс» и «Управление». В качестве транспорта используется технология WebSocket, позволяющая передавать данные с минимальной задержкой.

Объекты «Защищенный интерфейс. Клиент» и «Защищенный интерфейс. Сервер» реализуют основную логику протокола обмена и отвечают за выполнение требований, предъявляемых к защищенным интерфейсам.

Со стороны клиента с помощью объекта «Защищенный интерфейс. Клиент» серверу могут быть переданы только две команды: «Старт», инициирующий процесс проверки, и «Стоп», для принудительной остановки в случае необходимости. Объект «Защищенный интерфейс. Сервер» принимает команды от клиента и проверяет являются ли они разрешенными. Не допустимая команда игнорируется сервером.

В ходе выполнения проверки объект «Защищенный интерфейс. Сервер» может передавать информационные сообщения, формат которых регламентирован. Аналогично, не допустимым командам, информационные данные в неправильном формате игнорируются.

Для подтверждения достоверности передаваемых данных в модуле «Защищённый интерфейс» реализован механизм подписи данных с использованием секретного ключа, не передаваемого между клиентом и сервером. Уникальная алфавитноцифровая последовательность генерируется модулем «Окно» в момент запуска модуля «Управление» и передается в модуль как аргумент строки запуска. Во время загрузки модуль «Пользовательский интерфейс» запрашивает у модуля «Окно» значение секретного ключа. Таким образом, два модуля могут осуществлять подпись передаваемых данных и проверять правильность получаемых.

Модуль «Управление»

Программный модуль «Управление» отвечает за общее управление программным комплексом, передачу данных между модулями «Методика» и «Защищенный интерфейс». Модуль «Управление» реализует функции веб-сервера и контроллера методики измерений. В момент запуска модуль «Управление» осуществляет контроль целостности программных файлов, и определение версии метрологически значимой части программного обеспечения. Для этого модуль обращается к функциям модуля «Идентификатор». Получив информацию о версии программного обеспечения, модуль загружает программный код модуля «Методика», тем самым получая функции для проведения всех запрограммированных видов проверки. После этого запускается веб-сервер предоставляющий объект «Защищенный интерфейс. Сервер».

После загрузки пользовательского интерфейса, модуль управление ждет команды к началу проверки.

Получив команду «Начало проверки» и информацию об операторе, заводском номере проверяемого устройства и требуемом виде проверки модуль «Управление» создает в отдельном потоке исполнения программный объект реализующий методику проверки. Объект создается на основе программного кода модуля «Методика».

В ходе проверки модуль «Управление» получает информацию о ходе проверки и перенаправляет её через «Защищенный интерфейс» в пользовательский интерфейс.

Модуль «Идентификатор»

Во время копирования информации или передачи ее по сети не гарантируется ее целостность, что особенно актуально для больших объемов информации. Для проверки целостности информации были разработаны специальные алгоритмы, которые вычисляют некое значение, называемое контрольной суммой или хешем. Оно всегда одинаковое для одних и тех же данных. Таким образом, зная контрольную сумму оригинального файла, можно проверить идентичность его копии, рассчитав для нее соответствующий хеш и сравнив с оригинальным, если они не совпадут, значит в данных есть разница. Это можно использовать не только для проверки данных, загруженных из интернета и для поиска одинаковых файлов на компьютере, но и для идентификации ПО.

Хотя самих алгоритмов хеширования существует множество, наиболее распространенными являются CRC32, MD5 и SHA-1. CRC32 – циклический избыточный код, используется в работе программархиваторов. MD5 – 128-битный достаточно надежный алгоритм хеширования, используется не только для проверки целостности данных, но и позволяет получить довольно надёжный идентификатор файла. Последний часто используется при поиске одинаковых файлов на компьютере, чтобы не сравнивать всё содержимое, а сравнить только хеш. SHA-1 – используется для проверки целостности загружаемых данных программой Bit Torrent.

Согласно ГОСТ Р 8.654-2015 «ПАКТ 2.0» включает в себя метрологически значимую часть ПО. Для реализации требований ГОСТ Р 8.654-2015 о подтверждении подлинности и целостности ПО, а также для защиты от случайных или преднамеренных изменений получаемых значений и программного кода, в состав «ПАКТ 2.0» был введен модуль «Идентификатор».

Модуль «Идентификатор» состоит из dllбиблиотеки, содержащей функции для проверки достоверности «ПАКТ 2.0» и запускающего скрипта, написанного на языке программирования Python 3.6.

Целостность ПО определяется с помощью проверки контрольных сумм всех файлов, входящих в состав метрологически значимой части «ПАКТ 2.0» согласно ГОСТ Р 8.654-2015, по алгоритму MD5 и сравнения полученных значений с эталонными. Алгоритм устроен таким образом, что даже незначительные изменения данных приводят к значительным изменениям в получаемой контрольной характеристике.

Эталонные значения контрольных характеристик всех файлов из состава метрологически значимой части «ПАКТ 2.0» хранятся внутри dll-библиотеки, пользователь не имеет к ним доступа. Поэтому любые сбои или изменения, внесенные в программу без согласования с разработчиком, будут выявлены при запуске модуля.

Заключение

Модификация программного комплекса «ПАКТ» позволила упростить структуру программного обеспечения, повысить надежность его работы и сократить перечень программных зависимостей. В состав ПО введены модули для подтверждения целостности ПО и защиты от случайных или преднамеренных изменений метрологически значимой части ПО, что позволяет разрабатываемым на основе комплекса программам автоматизированного контроля соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.654-2015. Обновлённый состав используемых программных средств делает возможным функционирование в современных ОС Microsoft 7/8/10 и GNU/Linux.

Применение комплекса совместно с маршрутом разработки программ автоматизированного контроля позволяет сократить сроки разработки ПО и документации.

Литература

1. ГОСТ Р 8.654-2015: Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения;

2. Цепцова Н. В., Кузякин А. Г., Осипова Е. А., Серова А. О., Чеснов А. А. Модернизация комплекса программ автоматизированного контроля и тестирования для работы в современных операционных системах // Тезисы докладов XVI научно-технической конференции «Молодежь в науке» (25-27 октября 2017г.), Саров 2017г., с. 166.

3. https://electronjs.org [Электронный ресурс];

4. www.flask.poccoo.org [Электронный ресурс];

5. Серова А. О., Кузякин А. Г., Осипова Е. А., Цепцова Н. В., Чеснов А. А. Маршрут разработки программы автоматизированного контроля для проверки пультовой аппаратуры // Тезисы докладов XVI научно-технической конференции «Молодежь в науке» (25-27 октября 2017г.), Саров 2017г., с. 158.

6. СТО А 4523-2014: Аттестация программного обеспечения, применяемого при проведении измерений, и порядок ее проведения.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯСИСТЕМА ДЛЯ РАБОТЫ С ИНФОРМАЦИЕЙ ОГРАНИЧЕННОГО ДОПУСКА НА БАЗЕ ТОНКИХ КЛИЕНТОВ (ТЕРМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

<u>С. А. Якунина,</u> Н. Н. Вовк, А. Н. Гаврилин, А. С. Егоров, Р. В. Ефремов, Е. А. Жуненко, К. В. Леванов, И. В. Понеделко

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

Введение

Автоматизированная система (AC) – система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций (ГОСТ 34.003-90).

Тонкий клиент (англ. Thin client) в компьютерных технологиях – компьютер в сетях с терминальной архитектурой, который переносит всю или большую часть задач по обработке информации на сервер (рис.1). Тонкий клиент не имеет жесткого диска, использует специализированную локальную операционную систему, одна из задач которой организовать сессию с терминальным сервером для работы пользователя.



Рис. 1. Модель использования тонких клиентов в сетях с терминальной архитектурой

Технология «тонкий клиент» подразумевает централизованную архитектуру с центральным сервером приложений, который может быть связан с сервером баз данных, также с резервным терминальным сервером для повышения отказоустойчивости и надежности системы и с подключенными к нему компьютерами – терминалами.

В общем случае тонкие клиенты представляют собой персональные электронные устройства, обеспечивающие доступ к терминальной среде (Server-

Based Computing – SBC) или к виртуальной среде рабочих мест (Virtual Desktop Infrastructure – VDI). Их появление и развитие обусловлено общей парадигмой эволюции информационных технологий для делового применения в стремлении сократить затраты на автоматизацию делопроизводства. Есть широко известный термин совокупная стоимость владения (Total Costof Ownership - TCO) для любого рабочего инструмента, так вот основное интегральное преимущество тонких клиентов – это снижение показателя ТСО в сравнении с использованием традиционных персональных компьютеров и как итоговый результат снижение себестоимости любого конечного продукта. Если конкретизировать, то снижение ТСО для тонкого клиента складывается из снижения затрат на развертывание, эксплуатацию и управление, также можно отметить более длительный жизненный цикл и повышение безопасности [1].

В качестве операционной системы, устанавливаемой на сервере для использования на всех тонких клиентах, подключенных к данному серверу, предлагаем использовать операционную систему специального назначения «Astra Linux Special Edition» (далее – OC CH).). ОС СН предназначена для создания на её основе автоматизированных систем в защищенном исполнении, обрабатывающих информацию до грифа «совершенно секретно» включительно [2].

Данная ОС СН является операционной системой типа «А» и соответствует требованиям документов «Требования безопасности информации к операционным системам» (ФСТЭК России, 2016) и «Профиль защиты операционных систем типа «А» второго класса защиты. ИТ.ОС.А2.ПЗ» (ФСТЭК России, 2016) (рис. 2).

ОС СН является Российской разработкой и первой прошла сертификацию по новым требованиям ФСТЭК России. Благодаря новым требованиям, применение в государственных информационных системах операционных систем, исходные коды которых (в частности, систем безопасности) не представлены для проверки, существенно осложнено.

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ФУНКЦИИ СЗИ ОТ НСД



Рис. 2. Функции средств защиты информации от несанкционированного доступа ОС СН

Программно-аппаратный комплекс

При разработке данного проекта были учтены требования безопасности к организации автоматизированного рабочего места для работы с информацией ограниченного допуска. Комплекс разработан на базе технологии «тонкий клиент» (терминальный режим) с использованием ОС СН «Astra Linux Special Edition».

Комплекс позволяет реализовать следующие требования безопасности информации.

• Мандатное разграничение доступа

В операционной системе реализован механизм мандатного разграничения доступа – разграничение доступа субъектов к объектам, основанное на назначении метки конфиденциальности для информации, содержащейся в объектах, и выдаче официальных разрешений (допуска) субъектам на обращение к информации такого уровня конфиденциальности. Также иногда переводится как принудительный контроль доступа. Это способ, сочетающий защиту и ограничение прав, применяемый по отношению к компьютерным процессам, данным и системным устройствам и предназначенный для предотвращения их нежелательного использования.

Согласно требованиям ФСТЭК мандатное управление доступом или «метки доступа» являются ключевым отличием систем защиты государственной тайны РФ старших классов защитных систем на классическом разделении прав по матрице доступа.

Пример: субъект «Пользователь № 2», имеющий допуск уровня «не секретно», не может получить доступ к объекту, имеющему метку «для служебного пользования». В то же время, субъект «Пользователь № 1»

с допуском уровня «секретно» право доступа к объекту с меткой «для служебного пользования» имеет.

При этом принятие решения о запрете или разрешении доступа субъекта к объекту принимается на основе типа операции (чтение / запись / исполнение), мандатного контекста безопасности, связанного с каждым субъектом, и мандатной метки, связанной с объектом. Для удобства работы пользователей и разработки прикладных программ, разработана системная библиотека с удобным программным интерфейсом доступа к механизму мандатного разграничения доступа. Обеспечено взаимодействие входящих в состав операционной системы клиентсерверных компонент, а также файловых систем(ext3, CIFS) с механизмом мандатного разграничения доступа.

• Изоляция модулей

Ядро операционной системы обеспечивает для каждого процесса в системе собственное изолированное адресное пространство. Данный механизм изоляции основан на страничном механизме защиты памяти, а также механизме трансляции виртуального адреса в физический. Любой доступ нескольких процессов к одному и тому же участку памяти обрабатывается диспетчером доступа в соответствии с дискреционными и мандатными правилами разграничения доступа.

 Очистка оперативной и внешней памяти и гарантированное удаление файлов

Операционная система выполняет очистку неиспользуемых блоков файловой системы непосредственно при их освобождении. Работа этой подсистемы снижает скорость выполнения операций удаления и усечения размера файла, однако возможна настройка данной подсистемы для обеспечения работы файловых систем с различными показателями производительности.

Маркировка документов

Разработанный механизм маркировки позволяет серверу печати (CUPS) проставлять необходимые учетные данные в выводимых на печать документах. Мандатные атрибуты автоматически связываются с заданием для печати на основе мандатного контекста получаемого сетевого соединения. Вывод на печать документов без маркировки субъектами доступа, работающими в мандатном контексте с грифом выше «несекретно», невозможен.

Регистрация событий

Реализована оригинальная подсистема протоколирования, интегрированная во все компоненты операционной системы и осуществляющая надёжную регистрацию событий с использованием специального сервиса.

• Режим ограничения действий пользователя (режим «киоск»)

Режим «киоск» служит для ограничения прав пользователей в системе. Степень этих ограничений задается маской киоска, которая накладывается на права доступа к файлу при любой попытке пользователя получить доступ. Для установки прав доступа существует система профилей - файлы с готовыми наборами прав доступа для запуска каких-либо программ. Также есть средства создания таких профилей под любые пользовательские задачи. При входе пользователя в систему права доступа из конфигурационного файла устанавливаются автоматически.

• Защита адресного пространства процессов

В операционной системе для исполняемых файлов используется формат, позволяющий установить режим доступа к сегментам в адресном пространстве процесса. Централизованная система сборки программного обеспечения гарантирует установку минимального режима, необходимого для функционирования программного обеспечения. Также существует возможность использования технологии NOT EXECUTE BIT, поддерживаемой современными процессорами.

 Механизм контроля замкнутости программной среды

Реализован механизм, обеспечивающий проверку неизменности и подлинности загружаемых исполняемых файлов в формате ELF. Проверка производится на основе проверки векторов аутентичности, рассчитанных в соответствии с ГОСТ Р 34.10-2001 и внедряемых в исполняемые файлы в процессе сборки. Предусмотрена возможность предоставления сторонним разработчикам программного средства для внедрения векторов аутентичности в разрабатываемое ими программное обеспечение.

Контроль целостности

Для решения задач контроля целостности применяется функция хэширования в соответствии с ГОСТ Р 34.11-94. Базовой утилитой контроля целостности является программное средство на основе открытого проекта «Another File Integrity Checker». Средства организации домена

Для организации доменной структуры разработана подсистема Astra Linux Directory (ALD) на базе открытых стандартов LDAP. Эта подсистема предоставляет средства для организации домена и единого пространства пользователей, которые обеспечивают:

сквозную аутентификацию в сети;

 централизацию хранения информации об окружении пользователей;

 централизацию хранения настроек системы защиты информации на сервере;

– централизацию управления серверами DNS и DHCP;

 интеграцию в домен защищенных серверов СУБД, серверов печати, электронной почты, webсервисов и др.;

 централизованный аудит событий безопасности в рамках домена.

Защищенная реляционная СУБД

В состав операционной системы входит объектно-реляционная СУБД PostgreSQL, в которой реализованы дискреционный и мандатный механизмы контроля доступа к защищаемым ресурсам БД. В основе мандатного механизма разграничения доступа лежит управление доступом к защищаемым ресурсам БД на основе иерархических и неиерархических меток доступа. Это позволяет реализовать многоуровневую защиту с обеспечением разграничения доступа пользователей к защищаемым ресурсам БД и управление потоками информации. В качестве иерархических и неиерархических меток доступа при использовании СУБД используются метки конфиденциальности или метки безопасности операционной системы. Проведены необходимые работы по интеграции СУБД с подсистемой аудита и средствами организации домена.

• Защищенный комплекс программ гипертекстовой обработки данных

В состав защищенного комплекса программ гипертекстовой обработки данных входят браузер Mozilla Firefox и web-сервер Арасhe, интегрированный со встроенными средствами защиты информации для обеспечения мандатного разграничения доступа при организации удаленного доступа к информационным ресурсам.

Благодаря использованию архитектуры аппаратных средств – тонкий клиент (терминальный доступ), повышается безопасность корпоративных данных. Тонкие клиенты не имеют каких-либо устройств для хранения и записи информации пользователем. Абсолютно вся информация хранится на сервере и не передается по сети, снижается риск хищения данных и атаки вирусов. Для обеспечения повышенной безопасности можно воспользоваться дополнительными средствами, например, устройством чтения смарт-карт, usb-ключом или биометрическим считывателем отпечатков пальцев, которые подключаются к терминалу и предоставляют более высокий и сложный уровень аутентификации пользователей.

Преимущества тонких клиентов

Непосредственно на пользовательских терминалах (рис. 3) отсутствует возможность хранения конфиденциальных данных; нет съемных накопителей; на терминальном сервере можно обеспечить защиту от копирования важной информации на внешние носители на рабочих местах. Все данные хранятся на серверах, где регулярно и централизованно резервируются. Установка нового и обновление существующего программного обеспечения происходит значительно быстрее и проще. Наличие «контролируемой» среды на терминалах не позволяет пользователям запускать неразрешенные администраторами приложения.

Тонкие клиенты служат дольше и реже ломаются. Отсутствует шум, так как в них нет движущихся частей. Обеспечивается более продолжительный срок соответствия корпоративному стандарту – нормативный срок службы персонального компьютера составляет пять-семь лет, а если их меняют вследствие поломок или модернизации через два-три года, то возникает риск создания «зоопарка» оборудования. Терминалы морально не устаревают – рост требований к программному обеспечению вызывает лишь необходимость модернизации ядра терминальной системы, то есть сервера (рис. 4).



Рис. 3. Внешний вид тонкого клиента



Рис. 4. Внешний вид сервера тонкого клиента

Преимущества технологии «тонкий клиент»:

 снижение начальных затрат на приобретение оборудования, вследствие минимальных требований к конфигурации;

снижение энергопотребления в несколько раз;

унификация (одинаковый набор ПО для всех пользователей);

 простота администрирования (нет необходимости настраивать каждый компьютер по отдельности);

 экономия времени системного администратора. Все тонкие клиенты абсолютно одинаковы, вероятность поломок сведена к минимуму, а программное обеспечение установлено только на сервере;

 масштабируемость, созданный единожды образ системы для работы всей группы пользователей позволяет при минимальных затратах поддерживать легко масштабируемую сеть. Возможно быстрое создание любого количества новых рабочих мест;

 безопасность и отказоустойчивость. Терминал, загружаясь, получает операционную систему «от производителя», настройка которой осуществляется только отделом информационной поддержки.
 Все модификации операционной системы и прикладных программ никак не влияют ни на других пользователей, ни на образ, хранящийся на сервере.
 Вся пользовательская информация хранится на сервере и регулярно резервируется, что увеличивает отказоустойчивость;

 защита от утечек информации (нет локальных носителей – нет возможности делать копии документов на съемные носители информации);

 высокое быстродействие, по сравнению с отдельными рабочими станциями;

 простота наращивания вычислительной мощности (сервер легче модернизировать, чем весь парк компьютеров);

- ускорение работы корпоративных систем;
- повышенная эргономика.

Экономическая выгода использования тонких клиентов

Тонкие клиенты позволяют существенно экономить не только при первичном приобретении, но и при последующем их использовании за счет высокой отказоустойчивости, меньшему потреблению электроэнергию.

По оценке Gartner^{*} при использовании тонких клиентов совокупная стоимость владения (Total Costof Ownership, TCO) сокращается до 40% по сравнению со стационарным ПК или ноутбуком. Причем TCO состоит из ряда показателей затрат,

^{*} исследовательская и консалтинговая компания, специализирующаяся на рынках информационных технологий. Наиболее известна введением в употребление таких терминов (<u>ERP</u>, магический квадрант, цикл зрелости технологий), а также регулярными исследованиями рынков информационных технологий и аппаратного обеспечения

включая расходы на первичное приобретение оборудования, на последующее его обслуживание и модернизацию. При этом сокращение расходов в процессе эксплуатации нужно учитывать в первую очередь, поскольку согласно оценке Gartner затраты на приобретение составляют лишь четверть от общих затрат на последующую эксплуатацию этого же оборудования. Также на снижение TCO влияет более низкая вероятность сбоев тонких клиентов (рис. 5).

Экономические и эксплуатационные преимущества использования тонких клиентов:

 экономия при первичном приобретении. Тонкие клиенты требуют более низких первоначальных затрат на приобретение. По сравнению с обычным ПК стоимость тонкого клиента в среднем на 20 % ниже;

 экономия на программном обеспечении. Также существенно экономятся расходы на покупку программного обеспечения, т.к. тонкий клиент не требует локальной операционной системы, средств антивирусной защиты и других пользовательских приложений;

сокращение затрат на последующее обслуживание и модернизацию пользовательских рабочих мест. Время наработки на отказ (Mean time between failures, MTBF) для тонких клиентов составляет 100 тысяч часов. При этом для стационарных ПК данный показатель варьируется в пределах 20–30 тысяч часов;

 сокращение затрат на электроэнергию. Тонкий клиент в среднем потребляет в 50 раз меньше электроэнергии, чем стационарный ПК с усредненными характеристиками;

 повышение эргономичности. Тонкие клиенты работают практически бесшумно, имеют небольшие размеры и не занимают много места в офисном пространстве. Тонкий клиент занимает в среднем в 4 раза меньше места, чем обычный ПК.



Рис. 5. Сравнение соотношений показателей для тонкого клиента и стационарного ПК

Типовой проект автоматизированной системы

Существует отработанный процесс создания автоматизированных систем, основанных на терминальной архитектуре работы с данными в корпорациях, не связанных с предприятиями стратегического назначения. С развитием технологий по защите информации от несанкционированного доступа в отечественном кластере и развитием технологий шифрования и скоростной передачи данных от терминала к серверу появилась возможность интегрировать опыт терминализации ИТ инфраструктуры, полученный в корпорациях гражданской направленности, в инфраструктуру цифрового документооборота предприятия стратегического значения.

Опираясь на опыт разработки ведущих компаний по созданию AC, основанных на терминальной архитектуре, мы предлагаем проект AC на базе сервера «Aquarius N73 Q42»:

 регистрационный номер сертификата соответствия: СФ/СЗИ-0204;

срок действия сертификата соответствия:
 20.03.2018 – 20.03.2023;

 условное наименование (индекс): «Сервер «Aquarius N73 Q42» (№ 2150916096301 - 0001 (C8280FE05MA0035));

выполняемая функция соответствует требованиям ФСБ России по безопасности информации, предъявляемым к защищённым средствам вычислительной техники 2 категории, эксплуатируемым в выделенных помещениях, и Дополнению № 2 к ним (по 3 классу защищённости). А также может использоваться в выделенных помещениях до 2 категории включительно на территории Российской Федерации, в том числе органов государственной власти Российской Федерации, для обработки информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, при условии выполнения требований руководства по эксплуатации РЭ 4012 – 026 - 55017660-2016;

 изготовитель: ООО «Производственная компания Аквариус» 105082, Москва, Спартаковская площадь, д. 14, стр. 1.

Проведя анализ рынка предложений тонких клиентов с учетом специфики предприятий оборонной промышленности, предлагаем в нашем проекте AC использовать тонкий клиент ЭТОНК 1900.

Назначение ЭТОНК 1900 – обеспечение доверенной загрузки тонкого клиента и контроля целостности, идентификации и аутентификации пользователя до передачи управления операционной системе.

Преимущества ЭТОНК 1900:

 программная реализация, не требующая аппаратных средств;

 единственное на рынке средство доверенной загрузки, позволяющее противостоять атакам, направленным на модификацию BIOS;

экономичность и доступная цена, связанная
 с отсутствием дополнительных аппаратных компонентов;

 возможность применения в любых бизнеспроцессах, основанных на технологиях «клиент – сервер»;

 востребованность в медицинских, образовательных, муниципальных и учреждениях здравоохранения.
Технические характеристики ЭТОНК 1900 приведены в таблице.

Операционная	Astra Linux Special Edition						
система	Релиз Смоленск						
Процессор	Intel Celeron Processor J1900						
процессор	(2М кэш, до 2.42GHz), 4 ядра						
Память	RAM DDR3L 4Gb						
Графический	Intel HD Graphics, максимальное						
адаптер	разрешение: 1920х1080@60GHz						
	 DVI-I (2 Монитора) 						
	• DP						
Uurandaŭcu	• Разъем для наушников/микрофона						
интерфейсы	• 5x USB2.0						
	• 1x USB3.0						
	• Gigabit Ethernet (RJ-45) 10/100/1000						

Технические характеристики ЭТОНК 1900

Сертификаты ЭТОНК 1900:

– сертификат Минобороны России № 815, подтверждающий выполнение требований Приказа МО РФ, в том числе:

 руководящего документа «Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации» (Гостехкомиссия России, 1992) – по 3 классу защищенности от несанкционированного доступа к информации (в части требований «идентификации и аутентификации») подсистемы управления доступом и «целостность КСЗ» подсистемы обеспечения целостности;

 руководящего документа «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия не декларированных возможностей» (Гостехкомиссия России, 1999) – по 2 уровню контроля;

 криптографических и инженерно-криптографических требований к программным датчикам случайных чисел, используемых в средствах защиты информации объектов вычислительной техники Вооруженных Сил Российской Федерации;

 по соответствию реальных и декларируемых в документации функциональных возможностей;

• задания по безопасности ИЦ-ЭШ.586.

– ФСТЭК России № 1872, подтверждающий выполнение требований руководящего документа «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия не декларированных возможностей» (Гостехкомиссия России, 1999) – по 2 уровню контроля.

В качестве операционной системы, устанавливаемой на сервере для использования на тонком клиенте ЭТОНК 1900, подключенного к серверу в нашем проекте АС, предлагаем использовать ОС СН. Назначение и преимущества ОС СН описаны выше.

В дополнение к нашему типовому проекту можно использовать:

 программно-аппаратный комплекс доверительной загрузки «Соболь»;

 регистрационный номер сертификата соответствия: СФ/527-2623;

срок действия сертификата соответствия:
 30.06.2015 – 01.06.2020;

• условное наименование (индекс): «Программно-аппаратный комплекс «Соболь». Версия 3.0»;

 соответствует требованиям ФСБ России к аппаратно-программным модулям доверенной загрузки ЭВМ класса 1Б и может использоваться для защиты от несанкционированного доступа к информации, содержащей/не содержащей сведений, составляющих государственную тайну;

 изготовитель: ООО «Код Безопасности» 129075, Москва, Мурманский проезд, д. 14, корп. 1.

 – аппаратно-программный модуль доверенной загрузки «Тринити»:

 регистрационный номер сертификата соответствия: СФ/027-2527;

• срок действия сертификата соответствия: 25.12.2014 – 31.08.2019;

 условное наименование (индекс): «Аппаратно-программный модуль доверенной загрузки «Тринити АПМДЗ-С»;

 соответствует требованиям ФСБ России к аппаратно-программным модулям доверенной загрузки ЭВМ класса 2Б и может использоваться для защиты от несанкционированного доступа к информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну;

 изготовитель: ООО Фирма «Инфо Крипт» 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 105, к. 2.

Литература

1. Петухов Р. Н. Применение технологии «тонкий клиент» на промышленных предприятиях // «Молодой учёный». № 17 (121). Сентябрь 2016 г. С. 71–74.

2. Утвержден РУСБ.10015-01-УД. Операционная система специального назначения «Astra linux special edition» // Руководство по КЗС. Часть 1. РУСБ.10015-01 97 01-1. Январь 2015 г. С. 1-138.

содержание

Пленарные доклады

Мяндин Д. А. Разработка и реализация информационной системы поддержки принятия	
конструкторских решений при автоматизированном проектировании тороидальных трансформаторов	
для электронных узлов системы автоматики	4
<u>Тузов И. В.</u> , Чугров И. А., Мариничева Н. Н., Краева Н. Н., Вихорев А. С., Илюшечкина А. В. Получение	
и исследование морфологии поверхности сферических оериллиевых осолочек с заданным профилем	11
и прования медью	11
<u>Хаирулин И. Р.,</u> Радионычев Е. В., Антонов В. А. Вибрационно индуцированная прозрачность мёссбауэровского поглотителя: аналитическое и численное исследование	19
Секция 1. Теоретическая и математическая физика	

<u>Андреюк Н. А.</u> , Голубев А. И., Пятаков Н. П., Якутов Б. П. Численное моделирование лазерно- плазменного ускорения электронов в 3D и 2D постановке	26
<u>Баранов А. В.</u> , Бутнев О. И., Сидоров М. Л., Пронин В. А. Гидрологический модуль в программном комплексе «НИМФА»	33
<u>Баулин О. А.,</u> Шавлач К. Н., Хайруллина И. А. Решение прикладных задач аэродинамики в обеспечение наземной отработки изделий с использованием программного комплекса «ЛОГОС»	
<u>Бахаев А. Н.</u> , Горев В. В., Сидоров М. Л., Машенькин П. А. Модуль насыщенно-ненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации в комплексе программ «НИМФА»	47
<u>Близнюк О. Г.</u> , Гичук А. В., Власова О. Е., Лялюшкина И. В., Низамова И. А. Моделирование многофазных течений в многопотоковом приближении в ПК «ЛОГОС»	52
<u>Буркацкий А. С.</u> , Кудасов Ю. Б., Маслов Д. А., Сурдин О. М. Строение фронта ударной волны в одномерном кристалле	57
<u>Забавичев И. Ю.</u> , Оболенский С. В., Потехин А. А., Пузанов А. С. Моделирование развития каскадов атомных столкновений в полупроводниках с помощью суперкомпьютерных вычислений	63
<u>Казанцев А. В.</u> , Дьянов Д. Ю., Циберев К. В., Борляев В. В., Челаков А. А., Медведкина М. В., Наумова Е. И., Гельберг А. М. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения динамических задач прочности	71
<u>Каныгин И. И.</u> , Абдуллин М. Ф., Барабанов Р. А., Еременко А. Ю., Кварацхелия Д. Д., Косарим С. С., Наумов А. О., Филимонкин Е. А., Циберев К. В., Юлин А. В., Юносова В. А. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения статических задач прочности	78
Карпова Р. И., Глазунов В. А. Разработка и реализация в модуле ЛОГОС-ТЕПЛО двухтемпературной модели распространения тепла при воздействии ультракороткого лазерного импульса на металлы	85
<u>Медведкина М. В.,</u> Дьянов Д. Ю., Циберев К. В., Быков А. Н., Попов В. В. Виртуальный 3D принтер. Функциональные возможности топологической оптимизации конструкций	92
<u>Мокеев А. С.</u> , Рогачев В. Г., Кудряшов Е. А., Дерюгин Ю. Н. Одномерное численное моделирование распространения слабой ударной волны, вызванной воздействием на границу сплошной среды короткого единичного импульса лазерного излучения	99
Моськина Е. О. Препостпроцессор ЛОГОС. Алгоритм упрощения поверхностной треугольной сетки при решении задач аэрогидромеханики	107
<u>Наумова Е. И.,</u> Дьянов Д. Ю., Медведкина М. В., Шувалова Е.В. Пакет программ ЛОГОС. Реализация подходов и алгоритмов для моделирования поведения композиционных материалов	116
<u>Павлунина А. Е.</u> , <i>Герцик С. М., Краюхин С. А.</i> Численное моделирование эксперимента по механическому нагружению объекта исследования на стенде динамических испытаний с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС	123
Серякова И. В., Гельберг А. М., Дьянов Д. Ю. Пакет программ ЛОГОС. Реализация подходов и алгоритмов для моделирования бетонных и железобетонных конструкций	127

Секция 2. Экспериментальная физика

<u>Арзев А. Г.</u> , Галахов И. В., Ганин Л. С., Гришанин А. В., Елисеев В. В., Ирешев Е. В., Кабанов А. Ю., Креков А. В., Коженков Е. В., Лесков В. И, Мартыненко В. А., Мускатиньев В. Г., Осин В. А., Потапов С. А., Свиридов В. В., Сеник Д. А., Фролов О. В., Хапугин А. А., Чистопольский М. В. Разработка коммутатора мощных двуполярных импульсов тока на основе реверсивно включаемых динисторов с обратной проводимостью	136
<u>Архипов А. Ю.</u> , Богомолов А. В., Валекжанина Е. И., Городнов А. А., Иванов М. И., Картанов С. А., Михайлюков К. Л., Субботин А. Н., Таценко М. В. Расчетно-экспериментальное определение кривой пропускания различных материалов в протонной радиографии	141
Балабанов А. С., Кудрявцева Д. С., Маляров Д. В., Роженцов В. С. Проектирование взрывного метающего устройства для имитации воздействия на космический аппарат космического мусора	148
<u>Белошицкий К. А.</u> , Хоружий В. Х., Соколов А. Б., Грачев Д. В. Регулирование полуширины номинального импульса делений реактора БР-К1М с помощью графитового отражателя	152
<u>Величко К. С.</u> , Карпов И. А., Федотов Д. А. Выбор режима работы фокусирующей системы установки «Микрозонд» при фокусировке протонов с энергией 4 МэВ при помощи диэлектрического капилляра	160
<u>Галкин Е. Д.,</u> Гаганов В. Е., Андраманов А. В. Разработка программного обеспечения для управления элементами системы автоматической юстировки мощной лазерной установки	162
<u>Губкин А. С.,</u> Деркач В. Н., Добиков А. В., Лащук В. О., Щеников В. А. Автоматизированная система поиска дефектов оптических деталей	167
<u>Гурин Н. Е.,</u> Курякин А. В., Тумкин А. Д., Фильчагин С. В, Вихлянцев О. П., Рычков Ю. В., Катаев Н. В. Автоматизированная система управления током диспергирующего магнита масс-сепаратора С-2	171
расходимости лазерного излучения электроразрядного HF/DF лазера с неустойчивым оптическим резонатором	177
Демиденко М. А. Измерение и мониторирование энерговыделения в активной зоне импульсного гомогенного реактора испытательного комплекса	182
<u>Елин И. П.</u> , Жидков Н. В., Суслов Н. А., Тачаев Г. В. Измерение нейтронного выхода методом активации индия на установке «Искра-5»	186
<u>Здарьев А. Е.,</u> Лазарев С. А. Учёт формы чувствительной области при оценке частоты одиночных сбоев в интегральной схеме	192
<u>Зорин Р. А.,</u> Великанов С. Д., Воронцов К. В., Захаров Н. Г Коломеец В. Б., Лазаренко В. И., Надежин А. С., Николаев Н. И., Номаконов Г. Н., Синьков С. Н., Фролов Ю. Н. Твердотельный источник когерентного излучения дальнего ИК-диапазона	197
<u>Кидяйкин Д. А.</u> , Макаров А. Л., Гришин Д. М., Лебедев А. А. Методика определения выходных характеристик ускорителей типа БИМ	200
<u>Китаев И. Н.</u> , Дубинов А. Е. Некоторые виды обратных электростатических волн в плазме	205
<i>Тищенко А. С., Замураев Д. О., Шамраев А. Л., Сафронов К. В., Гаврилов Д. С., <u>Ковалева С. Ф.</u> Генерация предымпульсов в многопроходных лазерных усилителях</i>	213
<u>Козлов Г. А.</u> , Богданов Е. Н., Родионов А. В., Шаврин М. Е., Федоров А. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Гнутов И. С., Яговкин А. О. Ударно-волновая сжимаемость газообразного дейтерия	218
<u>Корниенко Д. С.</u> , Литвин Д. Н., Кравченко А. Г., Мисько В. В., Тараканов В. М. 4-х кадровый высокоскоростной электронно-оптический регистратор повышенного пространственного разрешения	222
<u>Кузин Р. С.</u> , Макейкин Е. Н., Анциферов С. А, Авдошин А. В., Гостев И. В., Герасимов А. Ю., Михалкин В. Н., Радайкин А. М., Шадрин А. А. Прохождение лазерного излучения через приземный спой атмосферы	228
Анфимов А. М., Горбунов В. С., <u>Кузнецов Д. В.</u> , Осипов С. Л. Обобщение результатов испытаний режимов с естественной циркуляцией теплоносителя, проводимых на реакторных установках	220
<u>Любимцева В. А.,</u> Дубинов А. Е. Наносекундные микроразряды в многослойных структурах	234 241

<u>Нечайкин Р. В.</u> , Буянов А. Б., Долотов А. С., Корчиков В. С., Сучков П. В., Сырых Е. В., Тренькин А. А., Цицилин П. А., Чернышов В. А. Разработка программно-аппаратного комплекса для дистанционного управления модулями на экспериментальном стенде	246
<u>Опекунов А. М.</u> , Беляев А. Н., Бодряшкин Я. В., Жуков И. В., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н., Машин И. А., Поляков Л. Е., Поспелов Г. П., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Шеин А. Н., Шориков И. В. Результаты экспериментов по исследованию характеристик ускоренных электронов с энергией 1,5 МэВ на ускорителе непрерывного действия с высокой мощностью пучка	252
<u>Осетров Е. И.,</u> Изгородин В. М., Соломатина Е. Ю., Пепеляев А. П., Кострикина А. А., Баринов С. П., Зарубина Е. Ю., Батуков С. Ю., Мариничева Н. Н. Эксперименты по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода инфракрасным излучением в сферической полистирольной оболочке	260
<u>Пискорский И. М.</u> , Овчинников М. А., Пикулина Г. Н., Юхневич В. А., Грачев Р. В., Савиных А. А., Сусляков М. В. Многофункциональные средства контроля нейтронно-физических параметров ядерных установок и их применение	263
<u>Седов А. В.</u> , Шестаков А. Е. Дифракционное исследование сжимаемости и фазового состава циркониевого сплава Э635 при статическом нагружении	267
<u>Спирин И. А.,</u> Седов А. А., Шалыгин А. А., Шевлягин О. В. Детонационные характеристики взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия	271
<u>Тепаев Д. А.,</u> Казаков С. А., Агапов А. А., Власов Ю. В., Демидов В. А., Володченков С. И. Исследование возможности повышения сопротивления взрывных размыкателей тока с ребристой преградой	276
<u>Тимаев Д. С.</u> , Адаменков Ю. А., Буйко С. А., Кудряшов Е. А., Мазанов В. А., Макейкин Е. А., Маркин С. В., Мелехин А. С., Рогачев В. Г., Сиренко А. В. Повреждение непрерывным лазерным излучением оптических элементов, загрязненных частицами углерода	280
<u>Трунцева Р. П.</u> , Пучагин С. Ю., Страбыкин К. В., Гордеев В. С., Чернышев Е. А., Залялов А. Н. Расчеты дозовых характеристик тормозного излучения электрофизической установки в ближней зоне	287
<u>Чабушкин А. Н.</u> , Манешкин А. А., Салтыков Е. В., Воронцов К. В., Лазаренко В. И., Захаров Н. Г. Эффективный лазер на поликристалле Cr:ZnSe, излучающий в средней ИК области спектра	291
<u>Шаталин А.А.</u> , Калинычев А. Е., Карпов Г. В., Ломтев С. С. Разработка метода калибровки магнитных датчиков для экспериментов на МКВ-4	294
<u>Юнин Д. А.</u> , Котков С. П., Кубасов А. А., Таракаенко П. В., Авдеев А. Д. Разработка макета системы управления реактивностью реактора ВИР-2М для реализации квазиимпульсного режима работы	298

Секция 3. Инженерные науки

<u>Боев Р. В.</u> , Елесин А. В. Численное исследование влияния предварительно нагруженного состояния на динамическую потерю устойчивости композитных цилиндрических оболочек	304
<u>Быков А. Г.</u> , Троцюк К. В., Ошкин И. В. Многолучевая высокопервеансная электронная пушка мощного электровакуумного прибора	310
<u>Вертей Е. Н.</u> , Иванов Д. Г., Кремзуков И. К., Чулков Д. В., Фадеева Е. В., Юнчина О. Ю. Диспегирование порошка электролитического циркония для использования в пиротехническом составе СЦМ	314
<u>Гагаркин Д. М.,</u> Галиуллин И. Г., Гармашев А. Ю., Сарафанников А. В., Махров В. И., Костицын О. В., Фролов Д. В., Ульянов С. М. Взрывное устройство для разделения пакета строп в вертлюге парашютной системы	320
<u>Гонов М. Е.</u> , Южина Т. Н. Методика изготовления бетонных образцов для динамических испытаний	326
<u>Горохов С. В.</u> , Негин А. В., Сергеев В. Е. Разработка топологии и технологии изготовления преобразователя на анизотропном магниторезистивном эффекте для датчиков угла поворота	334
<i>Каменев В. Г., <u>Каменева Н. А</u>.</i> Моделирование в среде ZEMAX и экспериментальная отработка телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм	338
<u>Кашафдинов И. Ф.</u> , Соломонов А. В., Царёв М. В., Забавин Е. В., Царёва И. А., Юнчина О. Ю., Киселёв П. Л., Пичугина С. А. Определение удельной поверхности аморфного бора методом низкотемпературной адсорбции азота	343

Егоров А. И., <u>Коянкин С. Н.</u> , Кузякин А. Г., Малахов И. А. Разработка унифицированной системы на кристалле для бортовой и наземной аппаратуры	351
<u>Лисовский О. Я.</u> , Стрельцов М. Ю. Создание опытного образца модуля реверсеров с системой автоматического управления ячейками Поккельса и системой автоматической юстировки	357
<u>Литвинов Р. Ю.</u> , Романов А. В., Буртасов С. И., Данилкин М. В. Исследования характеристик литий-ионных аккумуляторов	361
<u>Мигачев М. И.</u> , Вертей С. В., Ишеева И. В. Разработка кольцевой щелевой антенны	364
Ишеева И. В., Вертей С. В., <u>Мигачев М. И.</u> Разработка устройства возбуждения квадратного волновода	369
<i>Муравьева К. В.</i> Разработка вакуумплотного керамического материала со стабильными диэлектрическими параметрами	373
Асмолова Н. Ф., Забавичев И. Ю., <u>Насеткин К. А.</u> , Потехин А. А., Пузанов А. С. Исследования реакции микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений	376
Гандурин В. П., Герасимов С. И., Кузьмин В. А., <u>Одзерихо И. А</u> . Упруго-пластическая модель деформирования некоторых пород древесины, учитывающая скоростное упрочнение	380
<u>Осадчих А. В.</u> , Воронова А. Д., Гладков С. В., Ляднов А. Н., Сусуйкин А. Н., Хлопков Д. А. Комплекс технических средств автоматизированной системы управления и контроля ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1, ИЛТИ-1 № 2	386
<u>Письмаров М. Н.</u> , Анашкин А. С., Куфтин А. А., Ларичев Д. В. Исследование демпфирующих свойств конструкционных металлических материалов для защиты малогабаритной бортовой аппаратуры от динамических воздействий	390
Асмолова Н. Ф., Забавичев И. Ю., <u>Потехин А. А.</u> Пузанов А. С. Феноменологическая модель сбоев цифровых приемопередатчиков при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений	393
<u>Проскуряков А. В.</u> Чертов И. М. Отработка технологии лазерной сварки алюминиевых корпусов с крышками из состава приборов	398
Аушев А. А., Вихорев А. С., Коршунова Т. В., Порубов Р. В., <u>Прохоров С. М.</u> , Царева А. В., Шишлов В. В., Юрьев В. Л. Исследование технологии плазмохимического осаждения полимерных покрытий для изготовления лазерных мишеней	400
<u>Смирнов Д. Ю.</u> , Виноградов А. В., Леонтьев С. В., Барченков И. А., Кечин В. И., Абрашкин О. С., Лазуткина Т. В. Разработка транспортного упаковочного комплекта ТУК-159	404
<u>Смирнова С. И.</u> , Нураев Р. Х., Демарёва А. И. Результаты экспериментальных исследований макета малогабаритной системы активной виброзащиты	411
<i>Рябцов А. В., Лапшин Д. А., <u>Татарский А. М</u>. Анализ поведения тепловыделяющей сборки, расположенной в гильзе элеватора реакторной установки БН-800, при аварийном случае во время внутриреакторной транспортировки</i>	413
<u>Трепалов Н. А.,</u> Герасимов С. И., Гончаров Е. А., Львова Е. А., Нижегородцев Н. В., Роженцов В. С., Тотышев К. В. Мобильный аппаратно-программный комплекс оптико-физических измерений	419
<u>Уткина Ю. В.</u> , Баулин О. А. Расчет параметров ударной волны на больших расстояниях от объекта возмущений	425
Баулин О. А., Жучков Р. Н., Заузолков М. В., Машенькин П. А., <u>Шавлач К. Н.</u> Расчет процессов смешения, горения кислородно-водородной смеси и прогрева конструкции камеры сгорания тепломеханического стенда в связанной постановке	427
<i>Герасимов В. А., Суродин С. И., <u>Ширяев А. А.</u>, Шоболов Е. Л. Исследование дырочных ловушек в захороненном оксиде структур кремний на изоляторе методами на основе эффекта Пула – Френкеля и инжекции носителей заряда</i>	433
<u>Шубин А. С.</u> , Тихов А. А. Автоматизация проведения поверки многоканальных лазерно-гетеродинных приборных комплексов (PDV)	437

Секция 4. Информационные системы и технологии

<u>Боркивец</u>	Д.	<u>E.</u> ,	Егоров	A.	И.,	Кузякин	A.	Г.	Маршрут	функционального	моделирования	
аналого-ці	ифрс	эвых	схем		•••••			•••••				442

Ведерников В. В., Дунькович В. В., Горбатенко Н. В., <u>Горелова С. С.</u> , Кривошеев О. В. Обзор проблем перехода на процессное управление в сфере разработки и производства электронных приборов 4	448
<u>Дороднев Д. С.</u> , Кузнецова О. А. Разработка и внедрение автоматизированной системы управления исполнительской деятельностью	452
<u>Дьяков А. В.</u> , Надуев А. Г., Черевань А. Д., Кожаев Д. А. Модуль транспортного уровня ЛОГОС МИП для расчета связанных задач	455
<u>Ескова Е. А.</u> , Черевань А. Д., Надуев А. Г., Кожаев Д. А. Подсистема управления расчетными данными Интегратора ЛОГОС МИП	459
<i>Старостин Н. В., <u>Заиграев В. А.</u></i> Распараллеливание итерационного алгоритма уменьшения ширины ленты разреженной матрицы	463
Зарубин А. В. Ресурсоемкость пороговых схем разделения секрета при работе с 256-битными ключами	465
Анфимов А. М., <u>Кирилов И. Н.</u> , Кузнецов Д. В., Осипов С. Л., Гусев М. В., Кечков А. А., Сумароков С. В. Использование системной оболочки для организации и проведения расчетов в обоснование безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем	468
<u>Козлов Д. А.</u> , Труфанов С. И. Создание и развитие справочников для конструкторского проектирования и технологической подготовки производства 4	473
<u>Кононова В. Е.,</u> Дюпин В. Н. Имитационная модель нарушителя в системе мониторинга охранного предприятия	478
<u>Кочкина Л. Ф.</u> , Баканов С. В., Голеусова С. О. Опыт применения методологии процессного управления при слиянии/поглощении предприятий	482
<u>Кочкина О. Ю.</u> , Надуев А. Г., Черевань А. Д., Кожаев Д. А., Киселева Е. Б. Подготовка и решение задач оптимизации в Интеграторе ЛОГОС МИП	491
Анисимов Ю. А., Буренкова Е. В., <u>Левцова В. А.</u> , Смирнов М. К. Анализ результатов радиационных испытаний оптронов	495
<u>Логвин А. Ю.</u> , Аверина Н. С., Серова Т. Н., Шемякин А. В. Разработка системы автоматизированного верификационного тестирования расчетных программных модулей пакета программ «ЛОГОС»	498
<u>Макаров С. А.,</u> Малых Ю. А., Горячев А. П., Костин П. О., Романчак Е. И. Исследование характеристик линий передачи данных интерфейсного блока СМПО-100СА-IT	503
<u>Малахин В. А.</u> , Гончаров С. Н. Программная модель радиолокатора	506
<u>Родионова Т. В.</u> , Анисимов Ю. А., Вовк Н. Н., Клевнов Ю. В., Корепанов А. В., Кузьмин Е. Н., Лучкин Д. А., Сергеев Д. В., Царев М. А., Шмагин С. В. Опыт разработки и изготовления гибко-жесткой печатной платы из отечественных материалов	509
<u>Семёнов Г. А.</u> Мосина М. И., Иошкина М. А., Дроздов И. Ю., Афонина Г. В. Информационная система обработки данных на ядерно-физических установках	511
<i>Трусова Ю. О.</i> Обеспечение целостности данных на блочном уровне с использованием метода матричной связи для защиты данных в облачном хранилище	513
<u>Тюндина А. А.,</u> Надуев А. Г., Черевань А. Д., Жуков Д. А, Кожаев Д. А. Организация взаимодействия Интегратора ЛОГОС МИП с супер-ЭВМ	516
<u>Тюхтина П. А.,</u> Кондратьев Д. С. Отображение адаптивных данных методики КОРОНА в системе постобработки SCIENTIFICVIEW	520
<u>Хлопков Д. А.,</u> Воронова А. Д., Шмелькова Т. К., Осадчих А. В. Программное обеспечение автоматизированной системы управления и контроля ускорителей СТРАУС-2, ИЛТИ-1 № 1, № 2	524
<u>Цепцова Н. В.</u> , Осипова Е. А., Серова А. О. Программа для автоматизации контроля и тестирования «ПАКТ 2.0»	529
<u>Якунина С. А.</u> , Вовк Н. Н., Гаврилин А. Н., Егоров А. С., Ефремов Р. В., Жуненко Е. А., Леванов К. В., Понеделко И. В. Автоматизированная система для работы с информацией ограниченного допуска на базе тонких клиентов (терминальный режим) с использованием отечественной операционной системы специального назначения	535

Научное издание

Молодежь в науке

Сборник докладов семнадцатой научно-технической конференции (30 октября – 01 ноября 2018 г.)

Компьютерная подготовка оригинала-макета: Генеральская Ю. Н., Мишкина Н. В., Моисеева Е. В.

Печатается с оригинальных текстов авторов

Подписано в печать 16.09.2019 Формат 60×84/8 Печать офсетная Усл. печ. л. ~63,5 Уч.-изд. л. ~66,5 Тираж 150 экз. Зак. тип. 1155-2019

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23