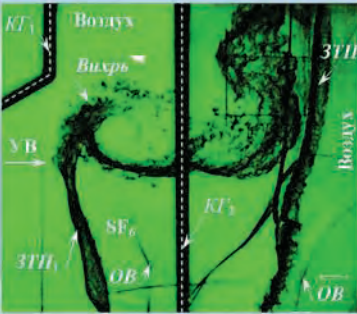
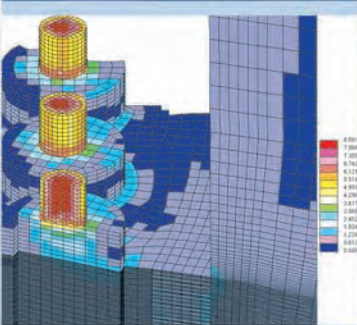
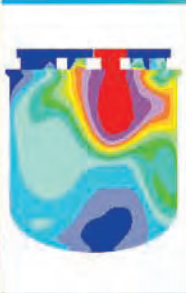
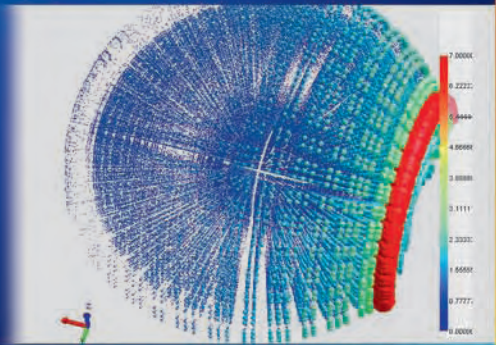


# ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

# 2008



САРОВ  
2009



# ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РФЯЦ-ВНИИЭФ



*ИПК готов выполнить для вас полный цикл полиграфических работ – от предоставления клиентам оригинальных идей до изготовления тиража. Новая технологическая линия полноцветной печати позволяет продукции ИПК быть конкурентоспособной на российском рынке многокрасочной печатной продукции.*

*Продукция ИПК – научно-технические сборники трудов ученых Ядерного центра, материалы конференций, совещаний, научно-популярные журналы, книги, справочники, учебники для вузов, рекламные буклеты, календари, бланки, визитки, листовая продукция.*

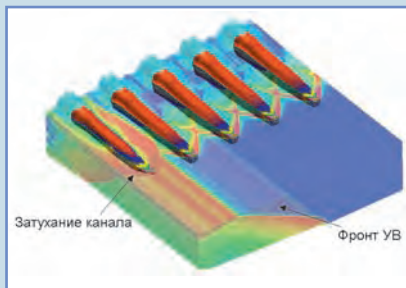
Заказать нашу продукцию можно:

- по телефону 8(83130) 7-75-96 или 7-75-84
- по электронной почте [kul@otd68.vniief.ru](mailto:kul@otd68.vniief.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

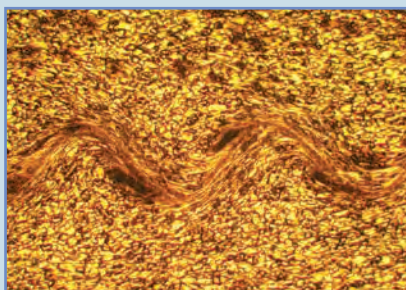
2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



16

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА



23

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ



### РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА:

академик РАН Р. И. Илькаев  
д-р физ.-мат. наук В. П. Незнамов  
д-р физ.-мат. наук А. Н. Сизов  
чл.-корр. РАН С. Г. Гаранин  
д-р физ.-мат. наук А. В. Ивановский  
Е. В. Куличкова  
д-р техн. наук А. Л. Михайлов  
д-р физ.-мат. наук В. Т. Пунин  
д-р физ.-мат. наук В. А. Разуваев  
д-р физ.-мат. наук В. Д. Селемир  
д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев  
д-р физ.-мат. наук Р. М. Шагалиев

РЕДАКТОР Л. В. Мазан

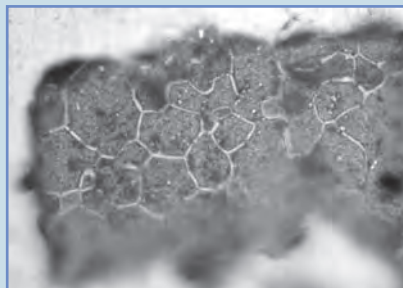
КОРРЕКТОР Н. Ю. Костюничева

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДГОТОВКА

ОРИГИНАЛА-МАКЕТА Т. В. Андреева

23

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



29

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



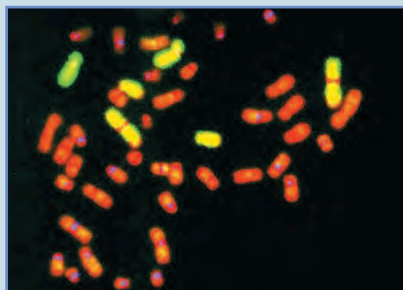
33

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО



35

ОТДЕЛЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



Подписано в печать 20.04.2009 г. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,3. Уч.-изд. л. 3.  
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 390-2009.  
Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23



## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Специалисты ИТМФ в 2008 году добились значительных успехов в разработке программных комплексов нового поколения, которые должны обеспечить эффективное компьютерное моделирование на многопроцессорных ЭВМ с массовым параллелизмом с использованием усовершенствованных физико-математических моделей.

Разработана новая методика КОРОНА и создан комплекс программ для расчета двумерных задач газовой динамики и теплопроводности с учетом турбулентного перемешивания (ТП). Особенностью данной методики является применение переменного по размеру разностного шаблона при аппроксимации уравнений газовой динамики и теплопроводности, что позволяет существенно повысить точность расчетов. Движение контактных границ между веществами рассчитывается лагранжевым методом вдоль всех пространственных направлений. Для расчета турбулентного

перемешивания применяется модель В. В. Никифорова, разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Результаты тестирования данной программы на большой серии задач, имеющих точное решение, а также в различных физических экспериментах показали, что программа КОРОНА обеспечивает хорошую точность расчетов и при измельчении расчетной сетки численное решение задач сходится к их точному решению.

Разработана первая очередь методики расчета и самой программы для решения методом Монте-Карло задач совместного переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов в трехмерных системах с использованием спектральных (с точечным заданием по энергии) и групповых библиотек нейтронных констант, а также библиотек констант  $\gamma$ -образования и  $\gamma$ -прохождения. Программа может быть использована для расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов, решения задач радиационной защиты, задач ядерной безопасности, широкого

класса реакторных задач. Важными особенностями программы являются учет фотонейтронных процессов и возможность расчета активационного  $\gamma$ -излучения. Для задания информации о геометрии, составах, источнике решаемой задачи, а также о результатах вычислений и используемых методах повышения эффективности счета используется специальный входной язык. Он позволяет достаточно просто, в свободном формате, задавать эту информацию с помощью любого текстового редактора. Расчеты задач по данной программе проводятся на большом числе процессоров многопроцессорных ЭВМ.

Созданы новые версии программных комплексов, основанных на связи газодинамической методики РАМЗЕС-КП с методиками расчета переноса частиц и излучения как разностными методами, так и методом Монте-Карло, что позволило расширить класс решаемых задач.

Первая очередь (однофрагментный вариант) методики ЭГАК-3D позволяет рассчитывать трехмерные ударно-волновые газодинамические течения с учетом прочности среды и детонации ВВ на адаптивно встраиваемых дробных сетках. Текущая версия методик включает в себя программы расчета на регулярных сетках. Программный комплекс сдан в опытную эксплуатацию.

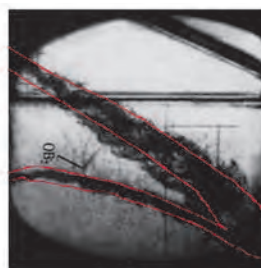
Продолжено развитие программного комплекса ЛОГОС-2 для расчета на многопроцессорных ЭВМ задач тепломассопереноса и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС).

В 2008 году:

- Предъявлена к сдаче в опытную эксплуатацию первая очередь комплекса для расчета теплофизических процессов (однофазные течения) и НДС. Проводились тестирование, верификация и валидация ком-



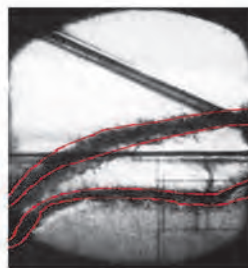
750 мкс



750 мкс

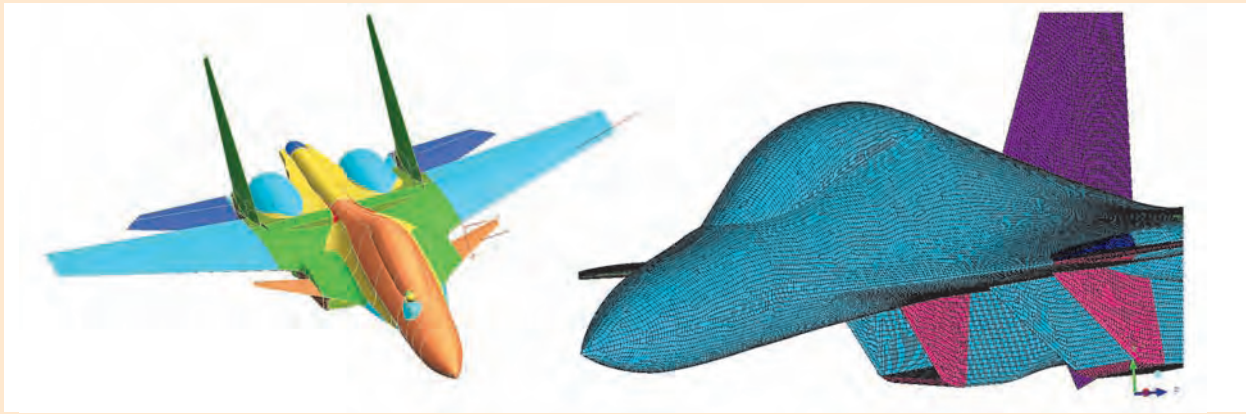


833 мкс



833 мкс

Сравнение положения зон ТП на контактных границах трехслойных газовых систем в двух опытах после прохождения ударной волны. Слева – расчет по комплексу КОРОНА; справа – эксперимент



Геометрия летательного аппарата и фрагмент поверхностной расчетной сетки. Расчетная модель содержит 31 млн ячеек. Расчет проводился на 500 процессорах

плекса в параллельном режиме на модельных, тестовых и производственных расчетах.

- С распараллеливанием вычислений на число процессоров до 1000 проводились расчеты:

- гидравлических течений и теплообмена в энергетических установках;

- аэродинамических характеристик летательных аппаратов.

- Разработана и программно реализована методика решения трехмерных уравнений Бринкмана – Форхгеймера, описывающих инерционные фильтрационные течения. Методика основана на методе конечных элементов.

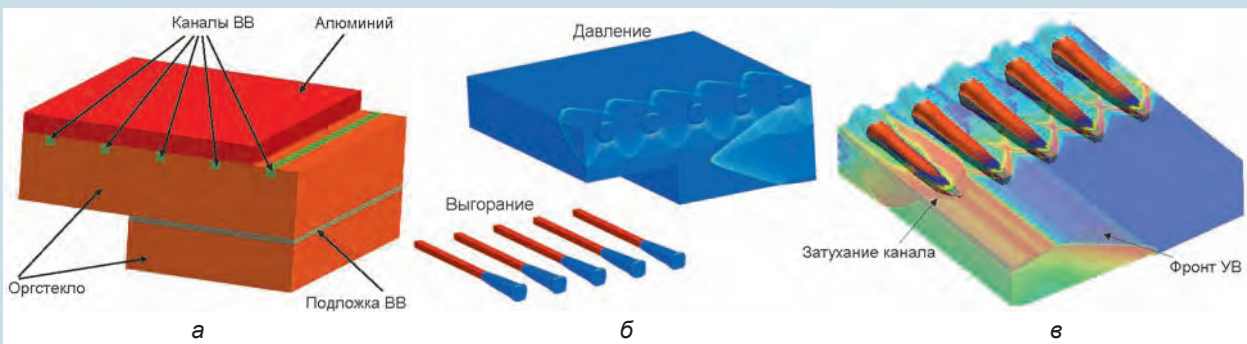
- Разработана концепция графической оболочки пользователя комплекса ЛОГОС-2, описаны необходимые функциональные возможности оболочки и предполагаемый интерфейс пользователя.

- Разработаны алгоритмы расчета нелинейных задач анализа НДС методом конечных элементов. Созданы первые варианты программ.

На основе методики СНД создана новая методика СНДМА (молекулярно-атомарная), предназначенная для расчета течений излучающей неравновесной молекулярной плазмы. Методика СНДМА основана на уравнениях одномерной газовой динамики, записанных в лагранжевых массовых координатах, уравнениях кинетики химических, ионизационных и фотореакций, уравнении переноса неравновесного излучения и взаимодействия излучения с веществом. Учитывается разность температур электронов и тяжелых частиц.

При моделировании процессов детонации особое внимание

уделяется эффекту, связанному с гомогенизацией ВВ и потерей его чувствительности (десенсбилизация) вследствие его предварительного нагружения. Физический эффект затухания детонации при распространении детонационной волны в каналах наблюдался, например, в так называемых детонационных логических элементах на угловых границах. По методике Д впервые был численно промоделирован эффект прекращения детонации при взаимодействии двух детонационных волн на примере модельной сборки. Расчетным путем было получено, что стационарная детонация с давлением на фронте  $\approx 30$  ГПа, распространяясь по невозмущенному ВВ, затухает при выходе на участок предварительно сжатого, но не подвергнутого разложению ВВ, то есть детонация вследствие



Результаты численного моделирования прекращения детонации ВВ: а – начальная геометрия; б – начальная стадия; в – пространственное расположение каналов и поперечной ударной волны

десенсибилизации ВВ прекращается, что полностью согласуется с результатами эксперимента.

В настоящее время базовым механизмом инициирования детонации в твердых гетерогенных ВВ является концепция «горячих точек» (ГТ или HS – hot spots). Взаимодействие ударной волны с дефектами структуры твердых гетерогенных ВВ приводит к неоднородности деформации сжатого объема ВВ, локализации и диссипации энергии в отдельных очагах, в которых начинается реакция разложения ВВ. Развиваясь в дальнейшем, они приводят к макроскопическому взрыву. В методике ЭГАК-3D впервые было проведено прямое численное моделирование образования и роста ГТ за характерные времена индукции детонации. При этом моделировалось распространение ударной волны по гетерогенному ВВ, имеющему газодные включения в местах соприкосновения гранул. В расчетах задавались два газовых включения и проводилось прямое численное моделирование неустойчивости на границах ВВ/продукты взрыва (ПВ) с учетом кинетики выгорания и теплопроводности. Физическая картина выглядит так: очень быстро происходит заполнение газового включения ПВ, затем в результате вихревого течения крупномасштабные частицы перемешиваются и дробятся до малых размеров, при которых за счет развитой поверхности контакта ВВ и ПВ успевает произойти прогрев ВВ (передача энергии от ПВ). Реакция разложения эффективно продолжается. Получена скорость роста очага свыше 100 м/с, что на два порядка превышает скорость горения при ламинарном течении. Расчеты впервые продемонстрировали важную роль турбулентности в детонационных процессах.

Методика СОЛЯРИС, предназначенная для численного решения на многопроцессор-

ных ЭВМ трехмерных задач переноса излучения и теплопроводности в произвольных областях с вакуумными полостями с учетом газодинамического движения вещества в оптически плотных слоях

и других физических процессов, сопровождающих эти явления, претерпела существенную модернизацию:

- к методике подключена программа одномерной газодинамики,

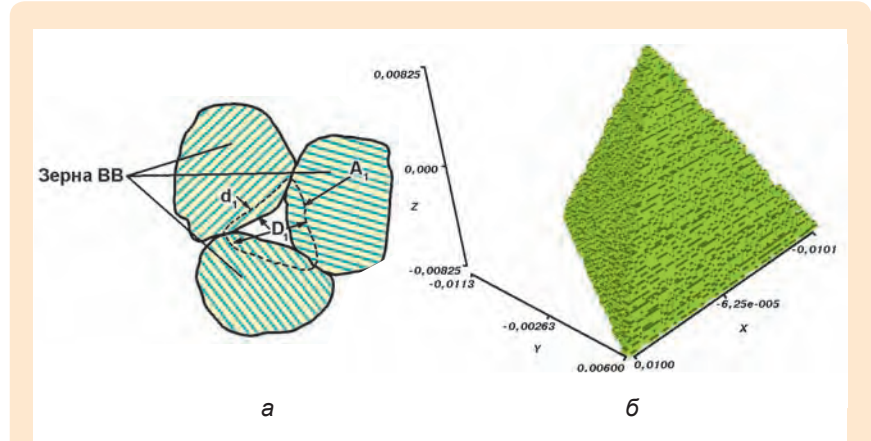
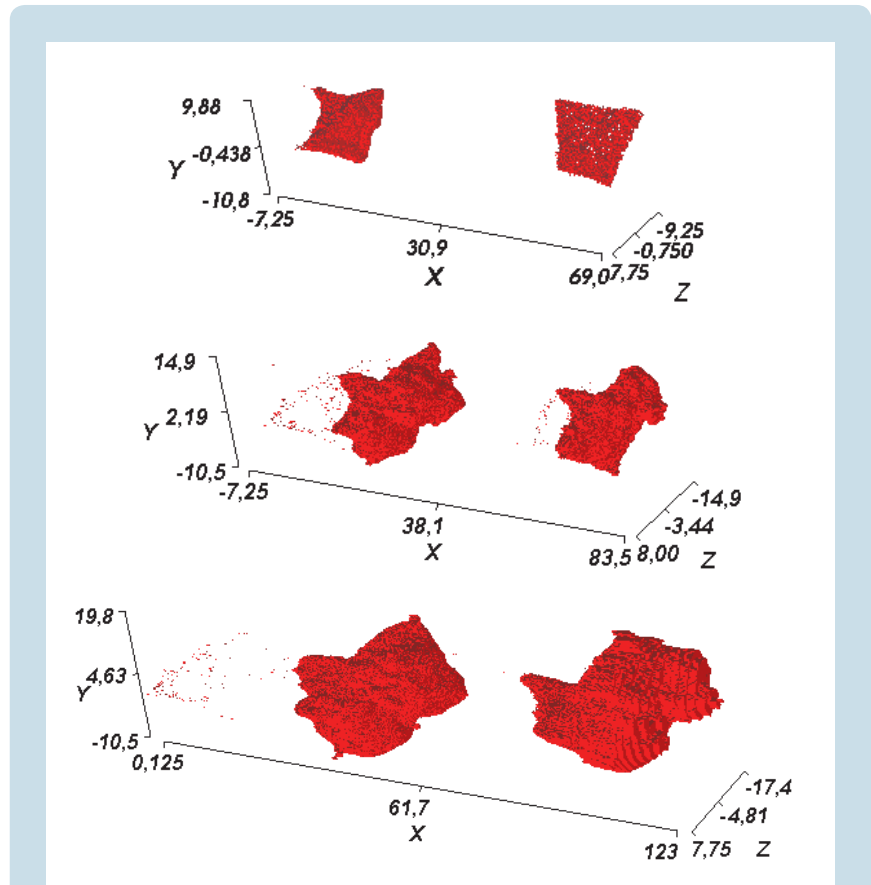


Схема газового включения (а) и начальная форма одного из газовых включений в расчете (б):  $A_1$  – поверхность горячей точки;  $d_1$  – толщина зоны реакции, вызванной ударом;  $D_1$  – характерная длина горячей точки



Картина формирования и роста горячего очага на три последовательных момента времени: 10, 30 и 50 нс (концентрация ПВ 100 %)



- разработан и реализован алгоритм связи цепочки секторов,
- реализован алгоритм учета движения вещества на основе одномерных газодинамических расчетов,

- введена возможность расчета лучистой теплопроводности,

- усовершенствован расчет коэффициентов видимости для трехмерной геометрии. Время расчета таких коэффициентов для осесимметричной геометрии стало сравнимо с временем расчета коэффициентов видимости для двумерной геометрии.

Усовершенствованы модели уравнений состояния (УРС) веществ с целью расширения области их применимости и повышения точности описания экспериментальных данных. Для этого на основе методики построения широкодиапазонных термодинамически согласованных УРС с использованием модели смеси разработан УРС алюминия. Для сшивки выбраны имеющиеся в библиотеке УРС-ОФ УРС типа РОСА-М и УРС, реализующий модель ТФПК (Томаса – Ферми с поправками). Сшивка этих уравнений позволяет рассчитывать термодинамические функции алюминия в диапазоне изменения состояний от близких к нормальным до соответствующих сверхвысоким концентрациям энергии.

Кроме того, разработан вариант модели УРС РОСА-М с эффективным учетом ионизации, в котором для учета вклада в давление и энергию термически возбужденных электронов введена возможность эффективного учета влияния ионизации на поведение термодинамических функций. Эффективность модифицированной модели продемонстрирована на примере описания экспериментальных данных и расчетов по УРС ТФПК в области сверхвысоких давлений и температур для алюминия и других материалов. Проведено также сравнение с расчетами по другим моделям УРС. Показано,

что в данном классе моделей (не учитывающих плавление и полиморфные фазовые переходы) модифицированная модель РОСА-М позволяет описывать как экспериментальные данные, так и расчеты по теоретической модели УРС ТФПК.

Проведены работы по распараллеливанию вычислений пробегов фотонов в веществе в программе ПЕРСТ. В параллельном режиме вычисляются вклады в коэффициенты поглощения отдельных электронных конфигураций. Это распараллеливание дает возможность выполнять вычисления пробегов фотонов в программе ПЕРСТ с высокой эффективностью на нескольких сотнях процессоров.

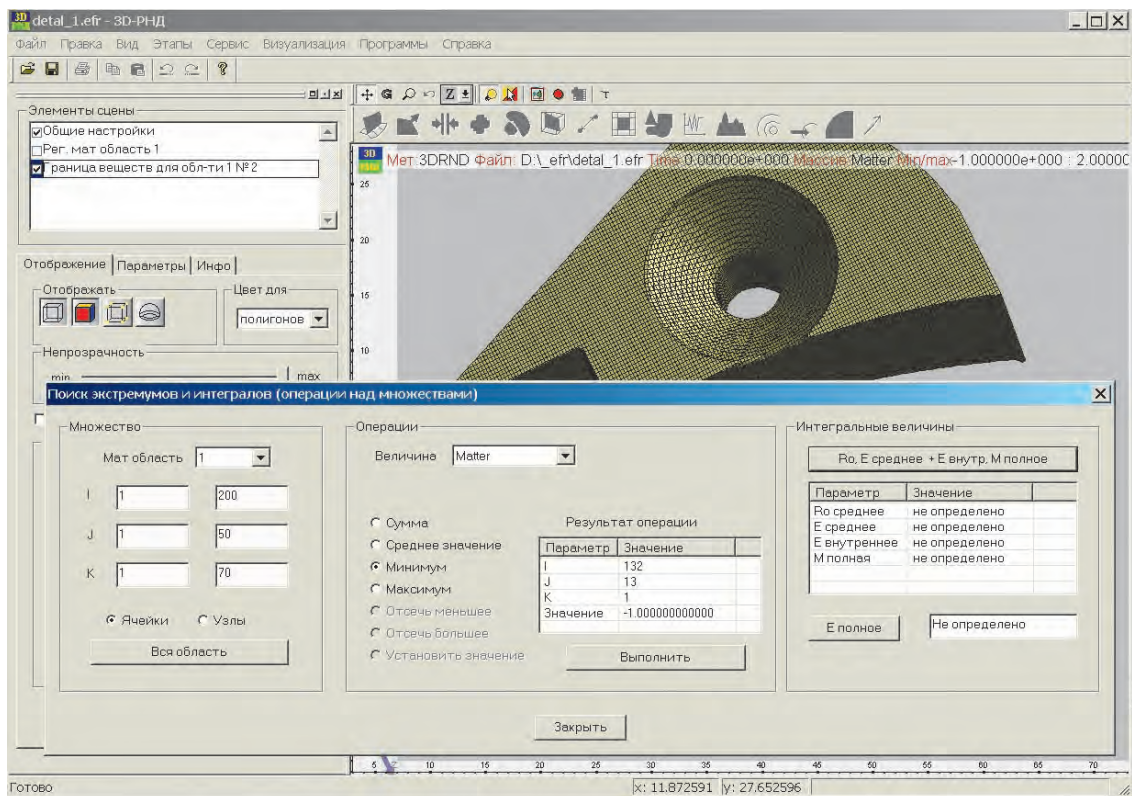
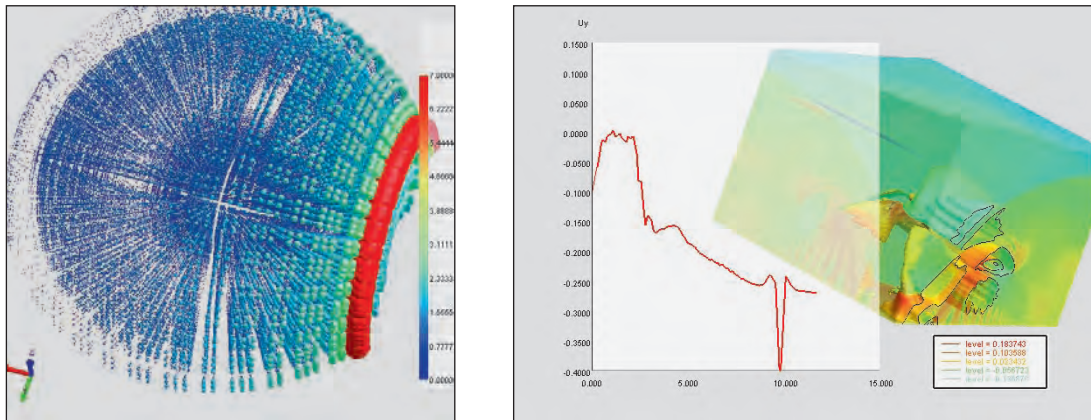
Завершено исследование эффективности алгоритма распараллеливания вычислений при решении двумерных уравнений Максвелла в  $2d3p$ -программе расчета взаимодействия лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой. Получены оценки элементарных затрат на отдельных этапах вычислений и установлена формула для эффективности алгоритма распараллеливания программы (код  $2d3p$ ). Показано, что при имеющихся оценках элементарных затрат более выгодным является алгоритм, в котором распараллелены только вычисления траекторий частиц, а уравнения Максвелла решаются на каждом процессоре для полных сеточных массивов компонент полей.

Завершены важные этапы работ по созданию единых для всех многомерных методик и программных комплексов средств графического задания начальных данных для расчетов и обработки результатов счета. Реализован прототип системы постобработки *ScientificView*, предназначенной для графического и численного анализа расчетных данных большого объема. Прототип полностью создан силами сотрудников

математического отделения ИТМФ и позволяет проводить в параллельном режиме анализ трехмерных регулярных сеточных данных с числом ячеек до 1 млрд. Данная работа не имеет аналогов на предприятиях атомной промышленности России. Для более точного анализа возможны следующие применения алгоритмов численного анализа: просмотр данных по выбранным мышью объектам; поиск экстремумов, интегралов, средних значений; вывод общей информации о задаче; интерполяция величин. Встроенные средства построения графиков позволяют проводить вычисления зависимостей величин и отображение полученных результатов вместе с расчетными данными.

В производственную эксплуатацию сданы графический редактор двумерных геометрий *Solid Editor* и программа 2D-РНД для задания и расчета сеток и начальных данных двумерных задач. Графический редактор *Solid Editor* позволяет в интерактивном режиме задавать геометрию и начальные данные двумерных задач, решаемых по большинству методик математического отделения ИТМФ. Переход методик на редактор *Solid Editor* позволяет унифицировать физическую постановку и сделать ее единой для всех методик. Тем самым уменьшаются количество ошибок и трудозатраты на задание физической модели, а на ее основе ускоряется формирование численной математической модели. Единая для большинства методик математического отделения ИТМФ программа 2D-РНД рассчитывает сетки и начальные данные двумерных задач на основе информации, заданной в графическом редакторе *Solid Editor*. Это позволяет одну и ту же двумерную задачу рассчитывать по разным численным методикам.

Реализована возможность расчета начальных данных для



Пример визуализации результатов расчетов с использованием пакета программ ScientificView

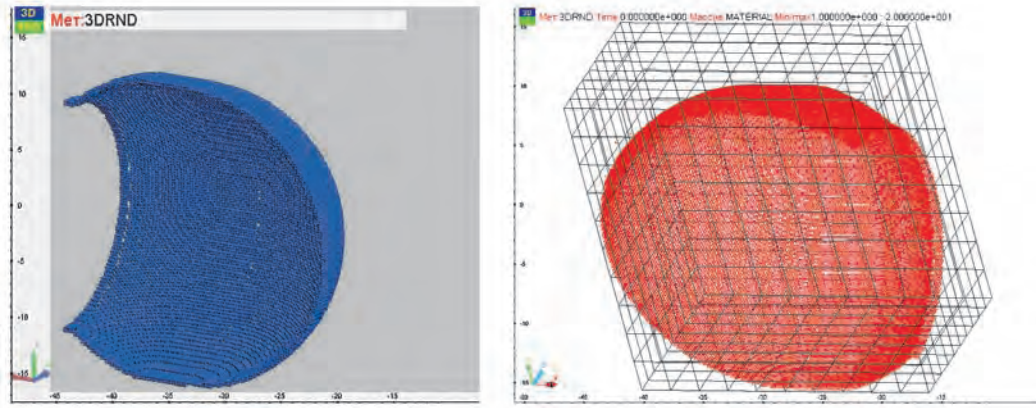
задач трехмерного численного моделирования физических процессов в смешанной постановке с использованием сеточных и бессеточных моделей. Данная возможность реализована в комплексе программ 3D-РНД и предназначена для использования в методике ЭГАК-КД для совместных трехмерных расче-

тов задач кластерной динамики и газодинамических течений.

Разработка высокопроизводительных многопроцессорных ЭВМ, их системного программного обеспечения и вычислительных сетей является одним из основных направлений деятельности ИТМФ. В 2008 году в ИТМФ создана вычислительная

система производительностью 20 терафлоп для работ по гражданской тематике, в том числе и в режиме доступа к ней других предприятий и организаций, в первую очередь ОАО ОКБМ «Африкантов» г. Новгород, ИТЭФ г. Москва, РИЦ «Курчатовский институт» г. Москва. ЭВМ вошла в состав создаваемого





Пример визуализации начальных данных задачи кластерной динамики.  
Число частиц – 10 млн., время расчета начальных данных 2 ч

при РФЯЦ-ВНИИЭФ вычислительного центра коллективного пользования (ВЦКП). Режим удаленного доступа предусматривает возможность специалистам различных организаций производить расчетное моделирование с использованием ресурсов ВЦКП непосредственно со своих рабочих мест.

Специалистами ИТМФ совместно с компаниями ТРОНИК, ДАТА Технологии и Саровские суперкомпьютерные технологии создан и введен в эксплуатацию суперкомпьютер в Пермском государственном техническом университете. Суперкомпьютер реализован на современной платформе AMD Barcelona, параллельной файловой системе и системе долговременного хранения. В последнем списке TOP50 (9-я редакция) самых мощных ЭВМ стран СНГ он занимает 21 позицию. Нашими специалистами спроектирован кластер, разработан комплект расчетно-конструкторской документации, осуществлен комплекс пуско-наладочных работ и оказана помощь университету в его освоении. Уникальность предложенного решения состоит в том, что благодаря оптимально продуманной архитектуре возможна одновременная работа с различными операционными

системами, что позволяет различным приложениям функционировать на единой аппаратной платформе.

В ИТМФ ведутся теоретические и экспериментальные исследования возможностей применения арифметических ускорителей (АРУ) в мультипроцессорных системах. В 2008 году выполнены исследования производительности гибридных систем на программных комплексах МД (молекулярная динамика) и Монте-Карло, получено существенное ускорение. Ведутся работы по адаптации структур программ и данных для вычислений на гибридных системах с АРУ, вырабатываются методические рекомендации для разработчиков программного обеспечения (ПО). Запланированы эксперименты по организации счета на гибридных системах и других программных комплексах математической физики.

Выполнен большой объем работ по развитию и созданию системного ПО для эффективного использования ресурсов многопроцессорных вычислительных комплексов с неоднородным аппаратным и программным обеспечением:

- в рамках системы для исследования и анализа эффективно-

сти выполнения параллельных приложений STK реализована поддержка мультиточечных MPI задач и параллельных приложений, использующих динамически подгружаемые библиотеки MPI, выполнена интеграция с единой системой управления заданиями (ЕСУЗ), обеспечены сбор и обработка расширенной статистической информации, повышающие информативность представления данных;

- на параллельных вычислительных комплексах внедрена в эксплуатацию масштабируемая система управления заданиями JAM (разработка ИТМФ), обеспечивающая автоматизацию массовых расчетов с учетом специфики управления счетом, особенностей архитектуры ЭВМ и структуры декомпозиции параллельных задач;

- усовершенствована ЕСУЗ в мультикластерном вычислительном комплексе НВК (неоднородный вычислительный комплекс), расширен набор поддерживаемых современных систем пакетной обработки заданий, расширена библиотека API, реализована планово-бюджетная подсистема, добавлены дополнительные средства для отображения и анализа данных STK;

- расширены функциональные возможности пакета Noise Measurement Suite для измерения неоднородностей и нестабильностей (шума) в работе многопроцессорных ЭВМ и повышения эффективности использования вычислительных ресурсов;
- реализовано управляющее ПО для высокопроизводительных коммуникационных сред, позволяющее объединить независимые подсети в глобальную вычислительную сеть на основе логической кластеризации;
- реализован масштабируемый высокоскоростной механизм управления стандартным потоком ввода-вывода параллельных приложений и загрузки исполняемого кода задания на процессоры на базе разработанного в ИТМФ транспортного протокола;
- реализована библиотека для обработки исключительных

событий в процессе выполнения параллельного приложения, позволяющая оперативно обнаруживать критические участки программы;

- реализован параллельный вариант системы автоматической миграции файлов.

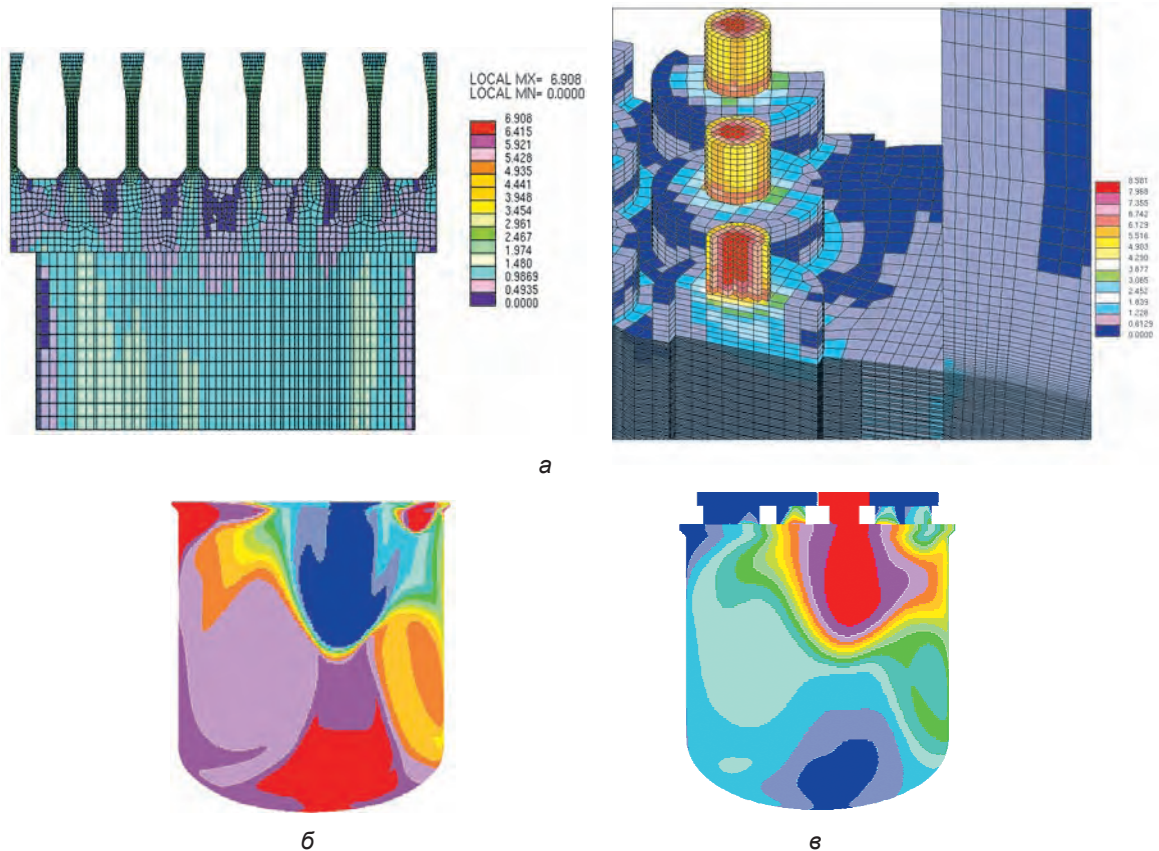
Существенное развитие в 2008 году в ИТМФ получили работы в интересах различных отраслей промышленности Российской Федерации, в первую очередь в интересах атомной энергетики. Особое место в этом направлении занимают совместные работы с ОАО ОКБМ «Африкантов», г. Н. Новгород, по развитию методов сквозного компьютерного моделирования на высокопроизводительных ЭВМ в интересах обоснования разрабатываемых в ОКБМ проектных решений ядерных энергетических установок (ЯЭУ) малой и средней

мощности. В рамках совместной работы специалисты ИТМФ:

- Разработали и создали многопроцессорную ЭВМ производительностью 20 терафлоп, которая вошла в состав ВЦКП и наряду с другими ЭВМ использовалась для проведения расчетного моделирования задач ОКБМ.

• Создали высокоскоростной канал связи для удаленного доступа специалистов ОКБМ к вычислительным ресурсам ВЦКП. Специалисты ОКБМ со своих рабочих мест проводили на ЭВМ расчеты ряда задач (задачи прочности и тепломассопереноса), решение которых невозможно на вычислительных ресурсах ОКБМ.

• Создали версию пакета программ PACHAP-2 разработки ОКБМ для расчета теплогидравлических процессов в активной зоне ЯЭУ в параллельном режиме на многопроцессорных ЭВМ.



Исследование гидродинамики и связанного теплообмена установки РИТМ-200 (ЛОГОС-2, 36 млн. точек):  
 а – фрагменты расчетной сетки установки; б – температура на внешней стенке;  
 в – плотность теплоносителя в пристеночном слое



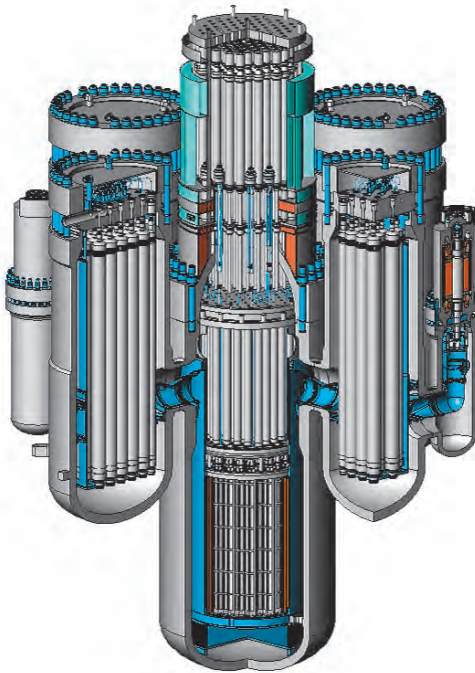
Введение параллелизма в пакет RASHP-2 позволяет существенно сократить календарные сроки проведения расчетов. После создания полностью параллельной версии программы (активная зона и все гидродинамические контуры и элементы) в 2009 году можно будет проводить расчеты

на большом числе процессоров в режиме on-line.

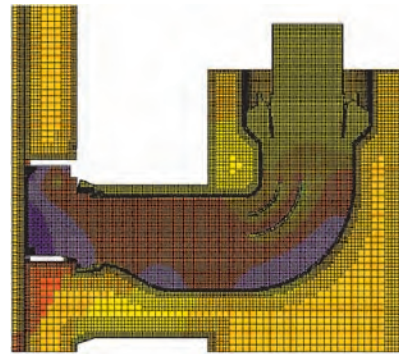
• Ведут работы по усовершенствованию созданных пакетов программ для расчета задач трехмерного инженерного анализа в интересах ОКБМ. Для программных пакетов ДАНКО (расчет задач прочности конструкций)

и ЛОГОС-3 (задачи тепломассообмена и НДС) завершены важные этапы разработок.

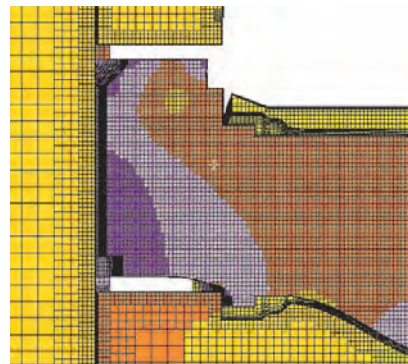
• Выполнили большой объем расчетных исследований по программным пакетам ЛОГОС-2 и ДАНКО в интересах ОКБМ на многопроцессорных ЭВМ (установки РИТМ-200, ВБЭР-300).



а



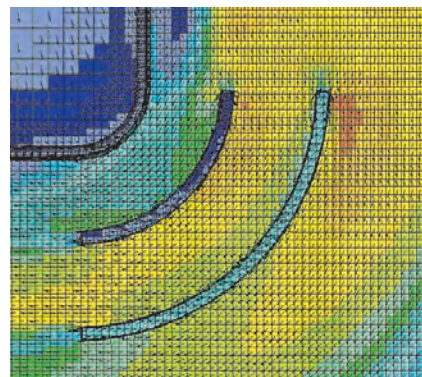
б



в

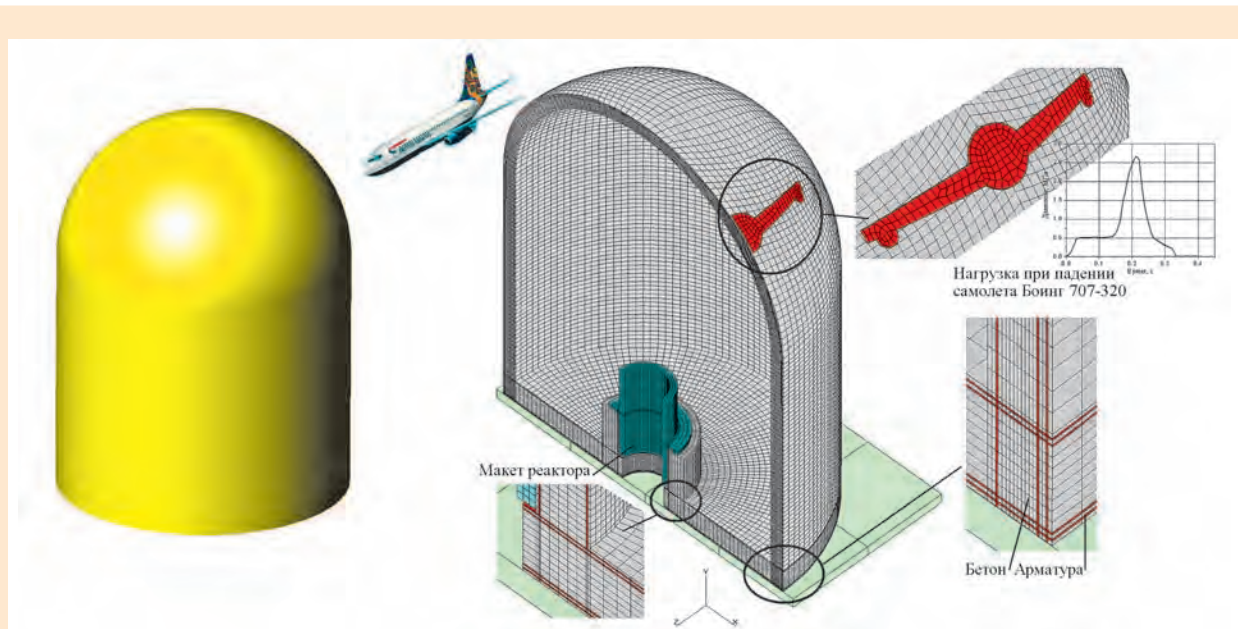


г



д

Исследование гидродинамики и связанного теплообмена установки ВБЭР-300 (ЛОГОС-2, 21 млн точек):  
а – реакторный блок установки ВБЭР-300; б – давление в насосе; в – давление на входе в кольцевой зазор;  
г – скорость в насосе; д – скорость на входе в кольцевой зазор



Конструкция и схема расчета динамических нагрузок на контеймент АЭС при падении на него самолета (пакет программ ДАНКО)

Как правило, для моделирования какого-либо физического процесса используется специальная программа. Моделирование работы сложных технических систем требует совместного счета программ, моделирующих различные процессы, с взаимным обменом данными. При этом программы могут быть разработаны разными коллективами авторов, а также иметь свои собственные форматы представления расчетных данных. Приведение данных к единому формату путем конвертирования является одной из основных проблем при связывании различных программ. Другой не менее важной проблемой является сохранение закрытости программы как интеллектуальной собственности. В рамках совместного проекта специалистами ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ и РНЦ «Курчатовский институт» разработана пилотная версия интеллектуальной среды распределенной библиотеки прикладного программного обеспечения (ИС РБППО). Разработана технология объединения независимых программных продуктов для моделирования сложных технических систем

на многопроцессорных ЭВМ с сохранением независимости и закрытости самих кодов. Технология обеспечивает:

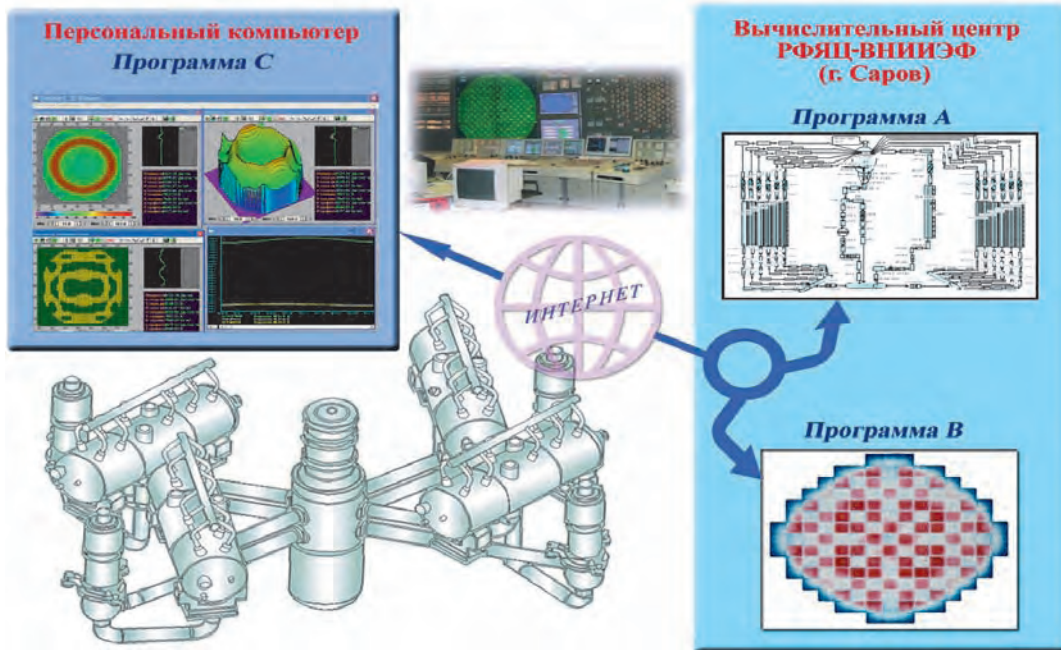
- гибкость при объединении независимых программных продуктов для совместных вычислений;
- сохранение закрытости кодов, моделей и форматов данных;
- минимизацию затрат разработчика по внесению изменений в программные продукты для подключения их к системе совместных расчетов;
- поддержку различных языков программирования;
- расчеты на многопроцессорных ЭВМ с удаленным динамическим контролем;
- использование больших объемов данных (благодаря децентрализованной организации);
- расчеты на вычислительных элементах разных архитектур под управлением различных ОС (Windows, Linux).

На эйлеровых сетках проведены МГД-расчеты сжатия лайнерных систем при больших токах (до 60 МА), магнитных полях (до 5 МГс) и скоростях лайнера (до 24 км/с). Эти системы представляют интерес для экспериментов

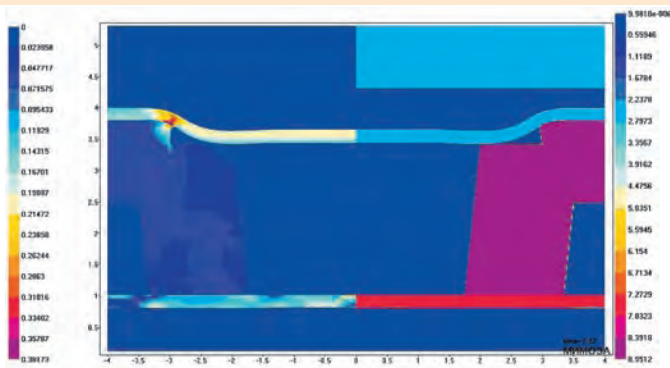
по измерению ударных адиабат конденсированных материалов при давлениях до 3000 ГПа. Учитывалась прочность алюминия и меди по упругопластической модели, и использовались широкодиапазонные УРС и проводимость для алюминия. В отличие от аналогичной лайнерной системы ALT-1, для которой были проведены эксперименты при вдвое меньших токах, магнитных полях и скоростях лайнера, здесь взаимодействие лайнера с торцевыми медными стенками приводило к нарастанию возмущений лайнера. Подбирая форму медных стенок, в расчетах удалось получить достаточно малые возмущения внутренней поверхности лайнера в качестве ударника.

С помощью программы ЭГАК изучались двумерные течения в ограниченной области, что имеет существенное значение для анализа поведения течения плазмы в камере МАГО. Наличие магнитного поля приводит к тому, что МГД-течение остается двумерным и его можно описывать с помощью обычной гидродинамики. Была рассмотрена эволю-

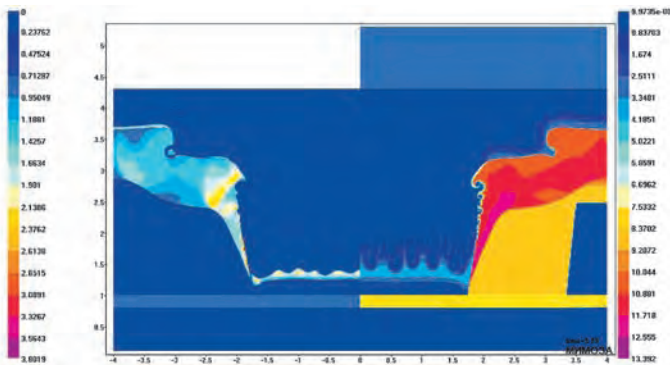




Использование ИС РБППО для связанных расчетов (нейтронно-термогидравлический расчет ЯЭУ)



а

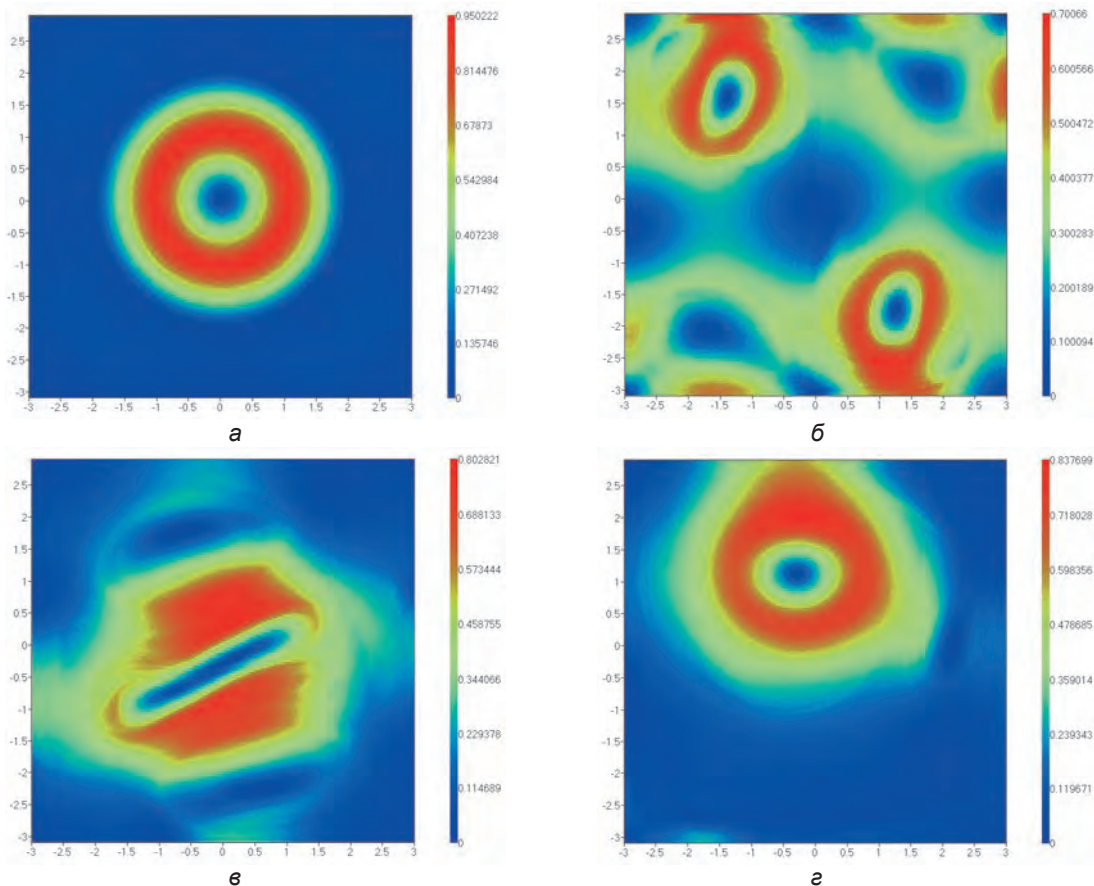


б

Изолинии плотности и предела текучести [ГПа] (справа и слева) в начале (а) и в конце (б) сжатия лайнера из МГД-расчета измененной системы ALT-1, ток ~ 60 МА

ция кругового вихря в квадратной области: конфигурация, которая является неустойчивой и должна приводить к турбулентному течению. Расчеты показали, что со временем течение приобретает сложный турбулентный вид, однако в дальнейшем возвращается к конфигурации одного вихря и сохраняет квазистационарную форму с небольшими искажениями. Такая форма сохраняется сколь угодно долго, и время ее существования определяется временем спада кинетической энергии, вызванного вязкостью.

Выполнен обзор результатов экспериментов на лазерной установке «Искра-5» по генерации линейчатого спектра рентгеновского излучения (РИ) в жесткой части спектра. В экспериментах по облучению плоских мишеней использовался один из каналов установки «Искра-5». Лазерное излучение (ЛИ) фокусировалось на плоскую мишень, расположенную внутри вакуумной камеры. В экспериментах интенсивность облучения варьировалась

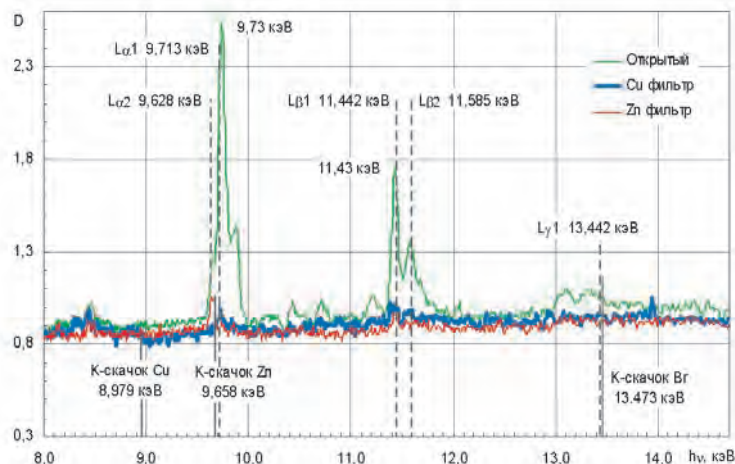


Пространственное распределение модуля скорости, полученное в расчете эволюции кругового вихря на моменты времени: а –  $t = 1$ ; б –  $t = 80$ ; в –  $t = 110$ ; г –  $t = 500$

в диапазоне  $3 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. В большинстве опытов облучалась плоская золотая (Au) мишень. Предварительный анализ результатов регистрации показал, что наиболее яркие спектральные компоненты по положению на спектрограммах близки к линиям  $L_{\alpha 1,2}$  и  $L_{\beta 1,2}$  холодного Au, облучаемого потоком ускоренных электронов. Основная составляющая линейчатой части спектра РИ определяется свечением внешнего (по отношению к направлению облучения мишени) слоя холодного золота под действием горячих электронов, генерируемых интенсивным потоком ЛИ. Исходя из эмпирической информации о спектре и интенсивности потока горячих электронов лазерной плазмы, получена расчетная интенсивность свечения холодного Au в

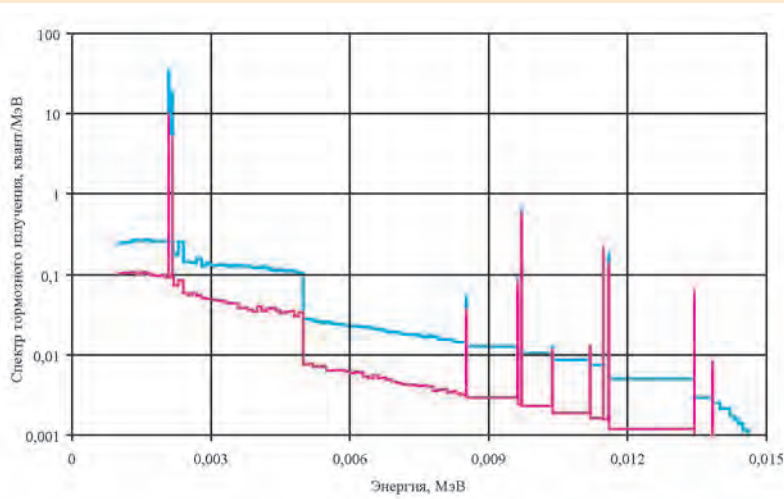
линии 9,7 кэВ  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  квант/4л при потоке  $\sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> ЛИ первой гармоники. Экспериментальный поток РИ в этой области энергии составляет  $\sim 3 \cdot 10^{11}$  квант/4 л.

Учитывая экспериментальные погрешности и реальную точность расчетов, можно считать такое согласие удовлетворительным.



Спектрограмма свечения Au с привязкой к энергетической шкале





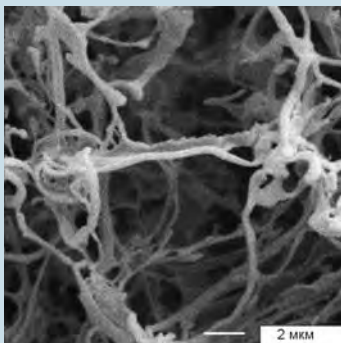
Спектральное распределение РИ при облучении потоком горячих электронов с энергией 15 кэВ (—) и 6,5 кэВ (—)

Пористые материалы широко используются в исследованиях газодинамических свойств веществ, в том числе и в интересах прикладных направлений работ Росатома. Использование ионных пучков открывает новые перспективы в таких исследованиях благодаря объемному характеру энерговыделения при торможении ионов в веществе и возможности получения малого (10–100 мкм) сечения пучка ионов для исследования микроструктуры вещества. Теоретический анализ процесса взаимодействия ионного потока с пористыми структурами показывает, что при низкой плотности среды форма кривой удельных потерь энергии  $dE/dx$  заметно деформируется, максимум брэгг-пика смещается

в область меньших расстояний и в распределении  $dE/dx$  появляется длинный «хвост», вызванный частью потока ионов, проходящих через слои с меньшей массовой толщиной вещества. В экспериментах на ускорителях ЭГП-10 (ВНИИЭФ) и Unilac (GSI, Дармштадт, Германия) энергетическое распределение потока ионов (страгглинг) при прохождении пористой мишени из полиэтилена существенно уширилось с толщиной мишени. После прохождения слоя плотного вещества (полиэтилена) страгглинг заметно меньше. В измерениях на ускорителе ТВН-ИТЭФ и ранее на ускорителе SIS18 (GSI) зарегистрирована существенная деформация формы брэгг-пика в конце пути торможения ионов мишеней из

пористой меди и графита. Как показал теоретический анализ экспериментальных данных, эти особенности вызваны неупорядоченной структурой пористого вещества. Таким образом, варьируя плотность и структуру пористого вещества, можно менять зависимость  $dE/dx$  мишени, что расширяет возможности исследований на новых мощных импульсных ускорителях ионов. В настоящее время в ряде исследовательских центров (ФИ РАН, ВНИИЭФ, GSI) изучается воздействие ЛИ и РИ на пористые вещества. Блоки расчета совместного воздействия лазерных и ионных потоков, реализованные в газодинамических программах ВНИИЭФ, позволяют проводить прямое численное моделирование эффектов такого воздействия. Примером является двумерный расчет воздействия потока ЛИ на пористую структуру, представляющую собой набор тонких (10 мкм) слоев пенопласта. Расчеты выполнены по методу Монте-Карло. В процессе воздействия импульса ЛИ эти слои разлетаются, их плотность становится ниже критической и ЛИ последовательно проникает к следующим слоям. Внутри мишени формируются газодинамические течения слоев, расчетные параметры которых отличаются от параметров, получаемых в расчетах в приближении однородного распределения вещества.

Работа выполняется в рамках договора с Росатомом (тема «Синтез») с участием ИТЭФ.



Микроструктура «пены»,  
 $\rho \approx 10^{-2} \text{ г/см}^3$

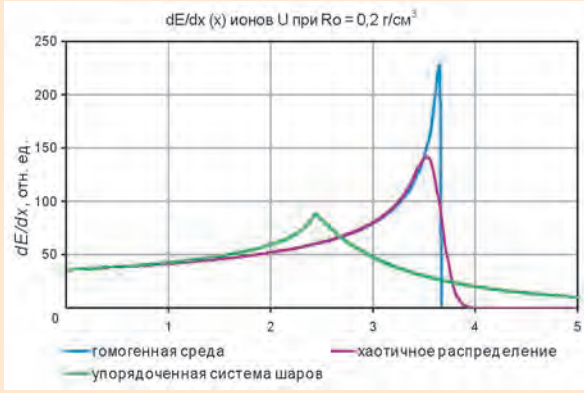


а

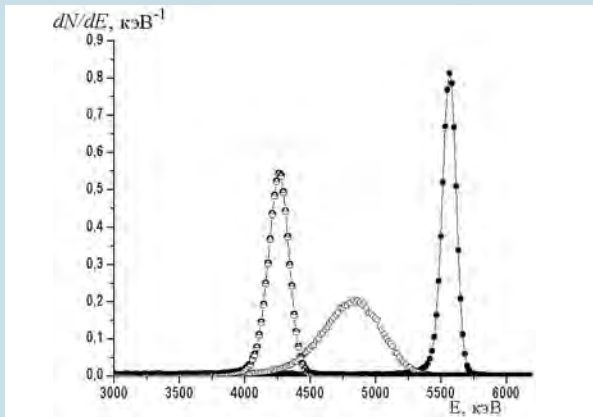


б

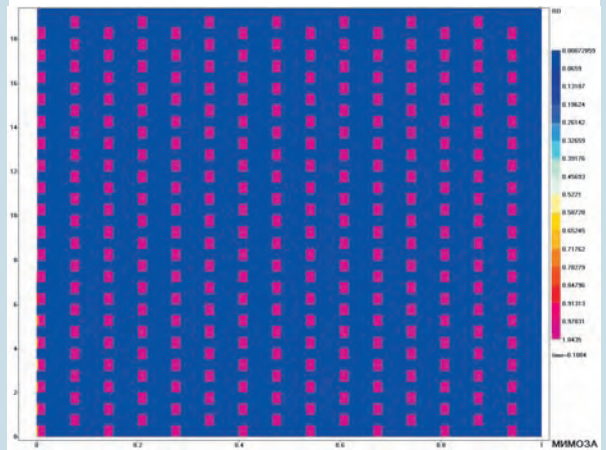
Пресс-материал из медной проволоки (а) и мишени на его основе (б)



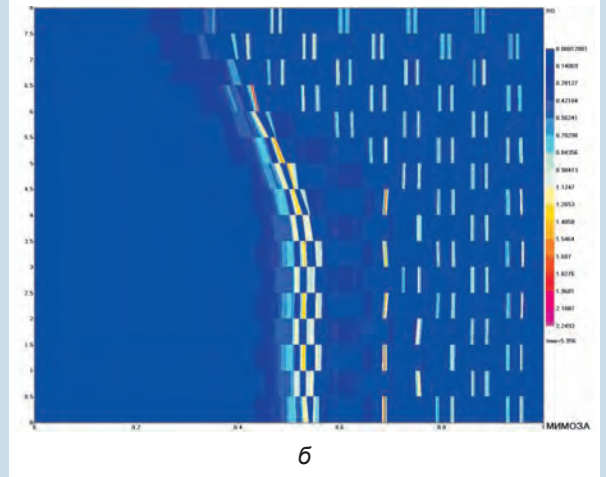
Расчетный профиль энерговыведения при торможении ионов в среде с высокой пористостью



Спектры протонов после прохождения плотных слоев ПММА-1 (●) и ПММА-2 (◐), а также пористой мишени с плотностью  $\sim 0,01 \text{ г/см}^3$  (◌) по результатам измерений на ускорителе ЭГП-10

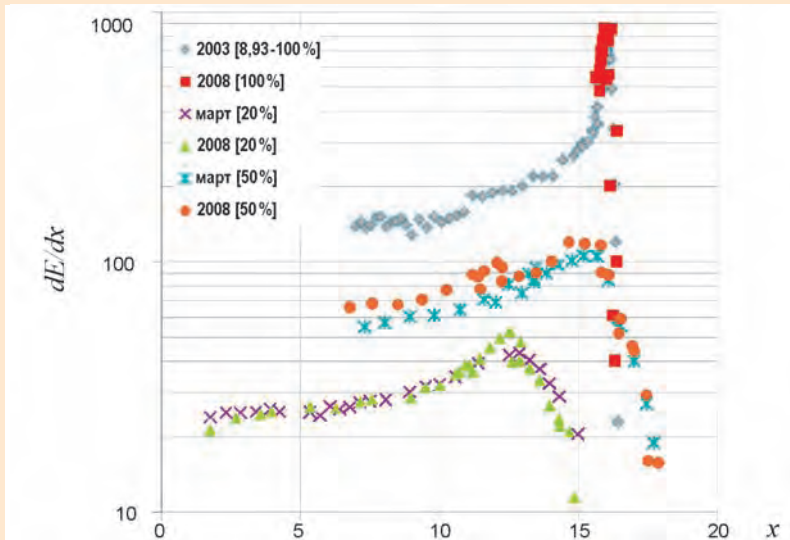


а



б

Распределение плотности в пористой среде до воздействия лазерного излучения (а) и в некоторый промежуточный момент времени (б)

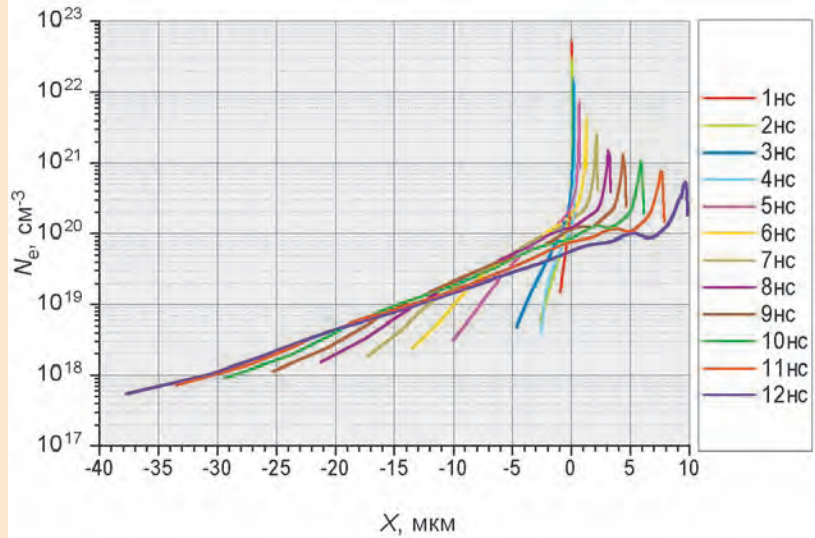


Зависимость  $dE/dx$  в мишенях из проволоночного материала различной пористости по результатам измерений на ускорителе ТВН-ИТЭФ от массовой толщины мишени

Исследование параметров взаимодействия ионных потоков с горячей плазмой является одним из важнейших направлений экспериментальных и теоретических работ различных лабораторий мира. Специалисты GSI и Дармштадского университета Д. Хоффманн, М. Рот, Р. Штёкл предложили в экспериментах на лазерно-ускорительном комплексе nhelix+Unilac разогреть фольгу потоком ЛИ с энергией в импульсе  $\sim 50$  Дж. Специалисты ВНИИЭФ проводят расчеты состояния мишени в результате облучения потоком ЛИ и потери энергии падающего на мишень потока ионов до и после воздействия ЛИ. Сквозь плазму, образованную в результате воздействия



ЛИ на мишень, пропускается поток ионов ускорителя Unilac (поток ионов  $^{36}\text{Ar}^{+18}$  с начальной энергией 1440 МэВ) и измеряются потери энергии ионов в результате их взаимодействия с веществом мишени. Из сравнения параметров потока ионов до и после воздействия ЛИ на мишень делается заключение о характере взаимодействия потока ионов с мишенью. Эффективность торможения в горячей плазме превышает эффективность торможения ионов в холодном веществе на ~40% по модели Мозеса и на ~90% по модели Баско. Расчетное влияние ионизации плазмы на тормозную способность согласуется с экспериментальными данными. Работы проводятся в рамках проекта МНТЦ# 2264.



Распределение плотности электронов по толщине мишени на различные моменты времени

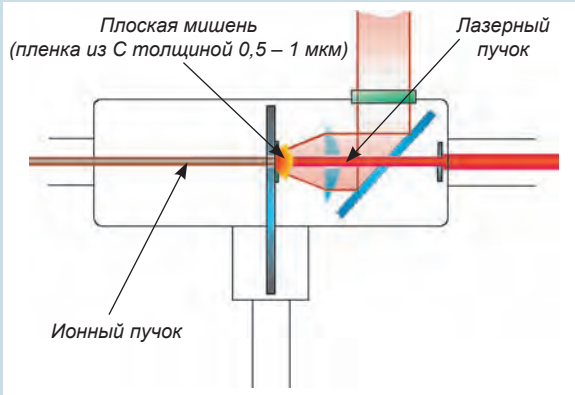
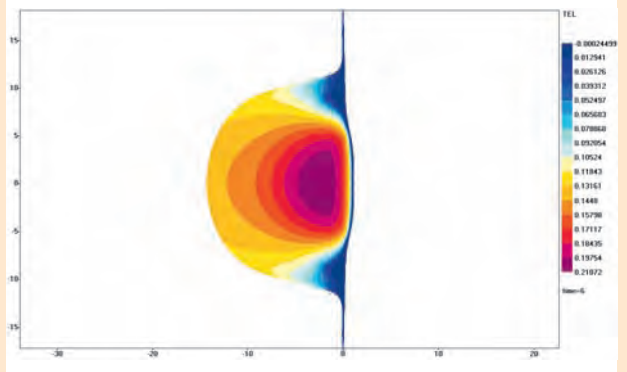
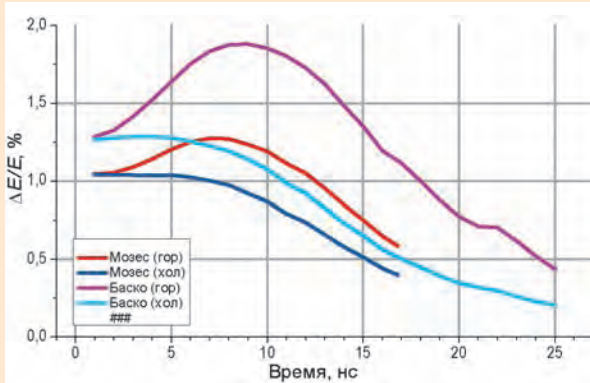


Схема экспериментов по исследованию взаимодействия потока ионов с лазерной плазмой



Пространственное распределение электронной температуры на момент середины лазерного импульса



Временная зависимость энергии ионного пучка, поглотившейся в мишени толщиной 0,5 мкм. Расчеты с температурной зависимостью («гор») и навязанным холодным торможением ионов («хол»)



Подготовка эксперимента

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

В настоящее время экспериментальные исследования развития гидродинамических неустойчивостей проводят на маломасштабных установках. В этих опытах из-за малой ( $\approx 70$  мм max) ширины зоны турбулентного перемешивания трудно определить влияние параметров течения (вязкости, поверхностного натяжения, ускорения) на развитие перемешивания, что необходимо для калибровки численных методов. В ИФВ создана экспериментальная установка КУ-210 с внутренним

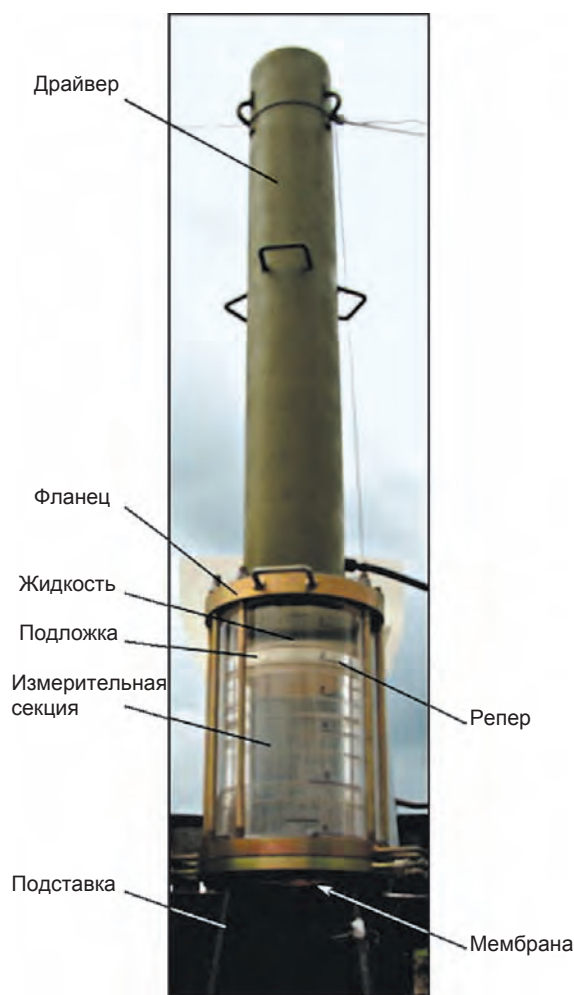
диаметром 210 мм, позволяющая исследовать развитие перемешивания и возмущений на границе газ–жидкость при ширине зоны до 200 мм, числах Рейнольдса до  $5 \cdot 10^6$  и ускорении  $g \geq 10^3 g_0$ .

В ИФВ создан измерительно-вычислительный комплекс для исследования пространственно-временной структуры турбулентных течений с применением лазерной диагностики и цифровой видеорегистрации, позволяющий:

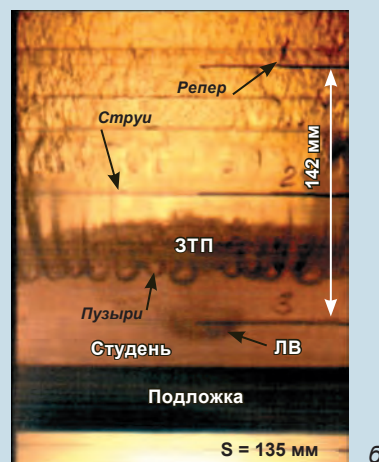
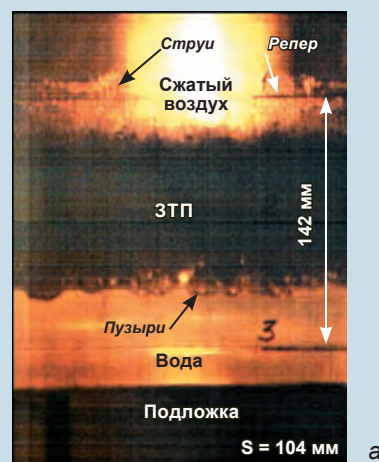
- регистрировать с высоким временным (нс) и простран-

ственным разрешением развитие гидродинамических неустойчивостей, турбулентного перемешивания и распространение ударно-волновых процессов в жидкостях и газах шлирен-методом, распределение плотности в зоне турбулентного перемешивания газов методом «лазерного ножа»;

- визуализировать микронные частицы в газодинамическом потоке, образовавшиеся, например, при развитии турбулентного перемешивания, диспергировании жидкости и при



Ускорительный канал КУ-210



Кинограммы опытов: а – развитие перемешивания на границе газ–жидкость; б – развитие локального возмущения (лунка  $R \approx 6$  мм) на границе газ–низкопрочный студень водного раствора желатина (ЗТП – зона турбулентного перемешивания; S – смещение слоя; ЛВ – локальное возмущение)



пылении металлов под действи-  
ем ударной волны;

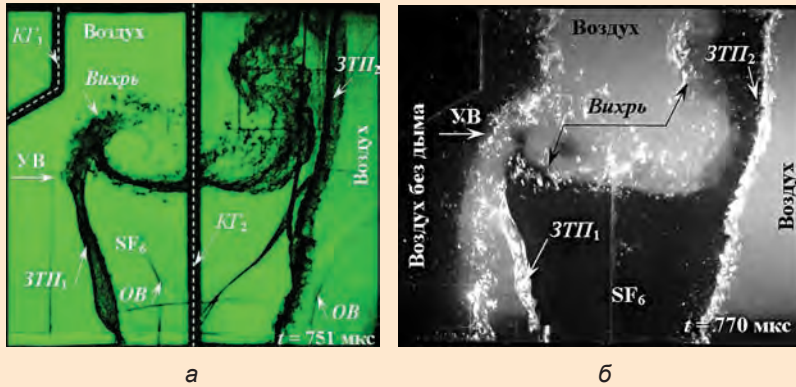
- регистрировать скорость и давление в газодинамическом течении.

Предложены и эксперимен-  
тально отработаны смесевые  
взрывчатые вещества (ВВ) для  
сварки взрывом. Основой со-  
ставов является смесь порошков

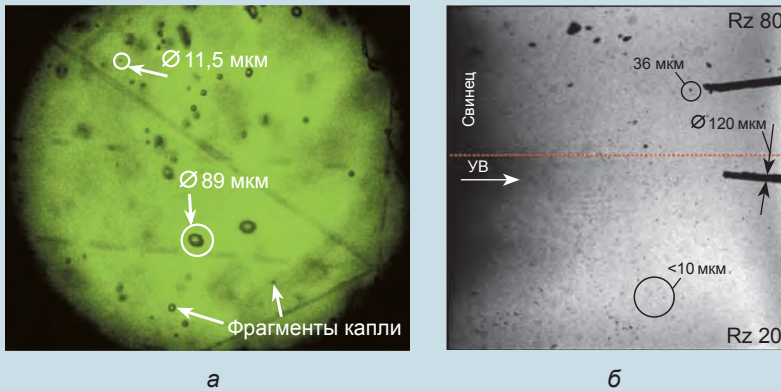
высокобризантного ВВ (гексоген,  
ТЭН) и инертного разбавителя  
(бикарбонат натрия – пищевая  
сода): гексоген – сода, крити-  
ческий диаметр детонации  
 $d_{кр} = 8\text{ мм}$ ; ТЭН – сода,  $d_{кр} = 6\text{ мм}$ .  
При использовании в смеси  
высокодисперсного ТЭНа (ВДТ)  
критический диаметр детона-  
ции понижается до 1,5 мм. Такие  
свойства позволяют существенно  
снизить деформации в области  
нагружения и проводить сварку  
взрывом полых конструкций или  
тонких листов (фольг).

На основании общефизиче-  
ских представлений и извест-  
ного аналитического решения  
Рихтмайера получены приближе-  
ния уравнения для оценки спек-  
тральных характеристик частиц,  
выбрасываемых с поверхности  
жидкости под действием ударной  
волны. Основные характеристи-  
ки спектра – распределение чис-  
ла и массы частиц по размерам  
определяются интенсивностью  
ударной волны, спектром началь-  
ных возмущений на поверхности,  
вязкостью и поверхностным  
натяжением. В случае жидких  
металлов поверхностное на-  
тяжение играет определяющую  
роль в формировании спектра.  
Найденные зависимости близки  
к экспериментальным резуль-  
татам, полученным Werdiger M.  
и др. в 1996 году для меди.

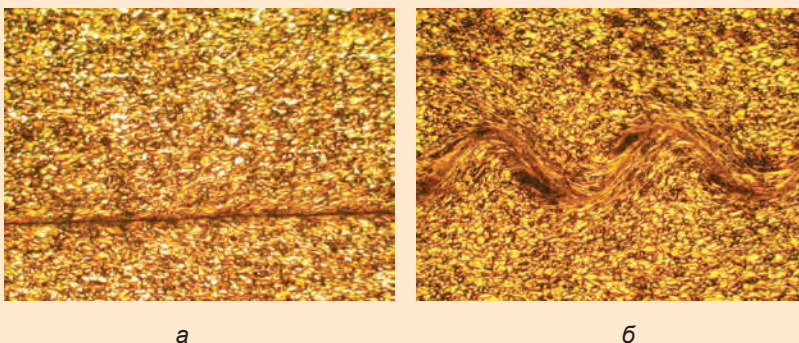
Исследование взаимосвязи  
деформации и структурных  
изменений – сложная задача  
реологии металлов. В течение  
2007–2008 годов проведены экс-  
периментальные исследования  
воздействия ударных волн раз-  
личной длительности и интен-  
сивности на структурные измене-  
ния и прочностные характери-  
стики меди с различным начальным  
размером зерна. Установлено,  
что ударно-волновое деформи-  
рование в диапазоне давления  
25–80 ГПа и времени действия  
ударной волны 1–1,5 мкс приво-  
дит к значительному увеличению  
плотности дислокаций с  $\sim 10^8\text{ см}^{-2}$   
до  $\sim 2 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ , при этом воз-  
растает и сдвиговая прочность.



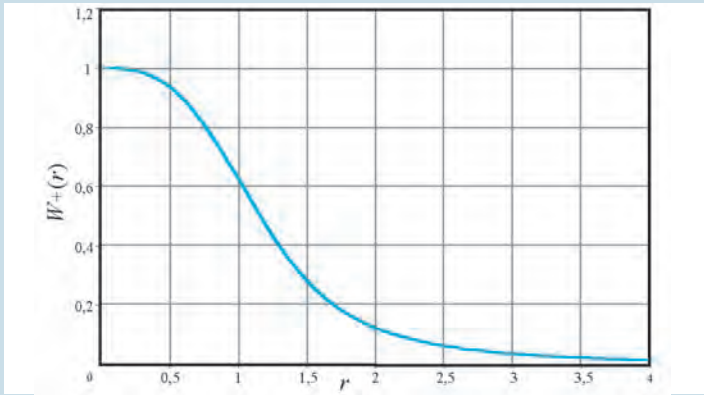
*Развитие турбулентного перемешивания  
в слое воздуха – SF<sub>6</sub> – воздух при двумерном течении:  
а – шликрен-метод; б – метод «лазерного ножа» ( УВ – ударная волна;  
ОВ – отраженная волна; КГ<sub>1</sub>, КГ<sub>2</sub> – контактные границы газов)*



*Микрочастицы в газодинамическом потоке:  
а – фрагменты диспергированной капли жидкости;  
б – частицы пыли свинца*



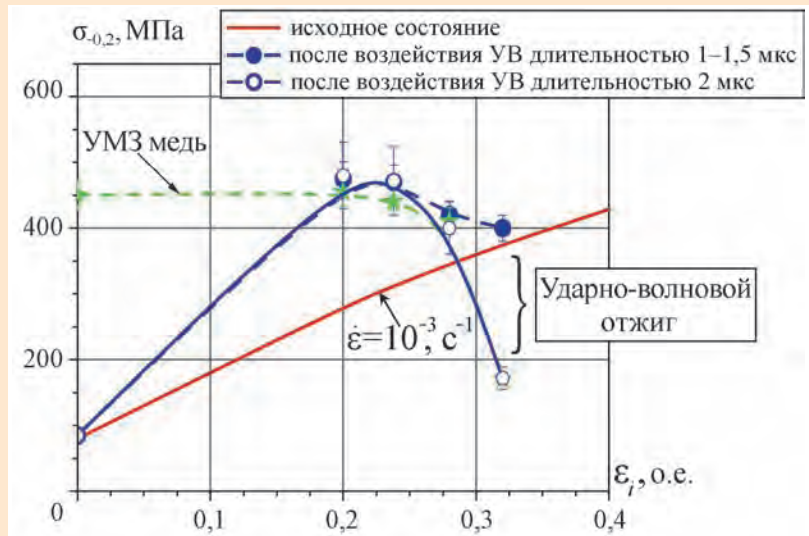
*Микрошлифы сварных швов для образцов из стали Ст. 3.  
Скорость деформации 2 км/с (а) и 2,3 км/с (б)*



Вероятность обнаружить выбрасываемую с поверхности жидкости частицу с относительным радиусом больше  $R/\bar{R}$ , где  $\bar{R}$  – наиболее вероятный радиус частиц

Проведены исследования плавления церия, олова и природного урана. Для этого при ударно-волновом нагружении с помощью методик индикаторных жидкостей и манганинового датчика определены зависимости упругой продольной и объемной скоростей звука от давления. Установлено, что граница области плавления составляет для церия 12 ГПа, для олова ~65 ГПа, для урана 130 ГПа. Исследования церия в окрестности изоморфного  $\gamma$ - $\alpha$  фазового перехода, характеризующегося скачком объема 16,5%,

При давлениях в ударной волне > 60 ГПа и времени ее действия ~2 мкс начинается существенное снижение плотности дислокаций и сдвиговой прочности. Это связано с тепловой аннигиляцией дислокаций за фронтом ударной волны. Таким образом удалось оценить время ударно-волнового отжига. Так, при давлении > 60 ГПа и температуре за фронтом ~600–700 °С за время 2 мкс плотность дислокаций и прочность снижаются до исходного состояния ~ $10^8$  см<sup>-2</sup>. Аналогичный результат получен и для мелкозернистой меди с размером зерна 0,5 мкм. Полученные данные будут использоваться при построении широкодиапазонной модели меди и других металлов.



Статическая  $\sigma$ - $\epsilon$  диаграмма сжатия крупнокристаллической меди в исходном состоянии и условный предел текучести после ударно-волнового нагружения давлением 25–75 ГПа различной длительности

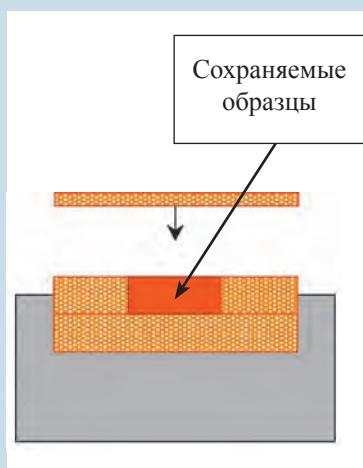
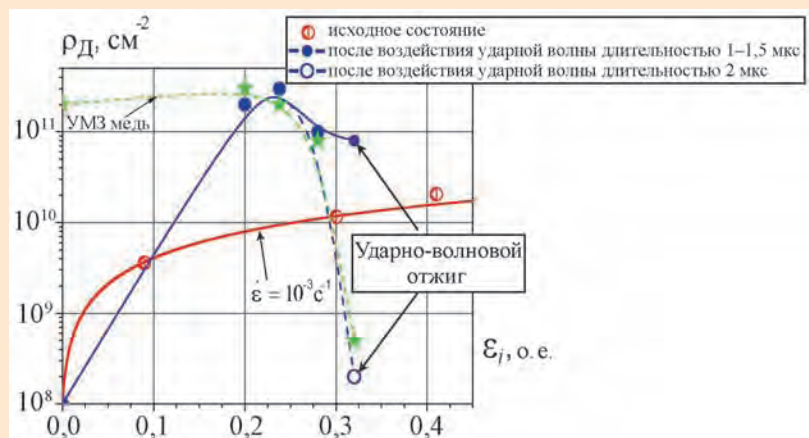


Схема экспериментов



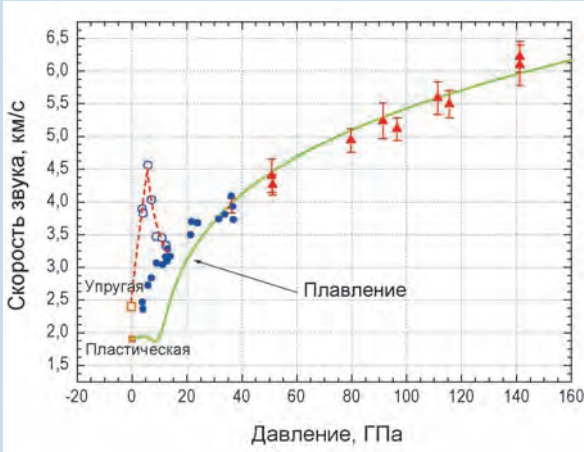
Зависимость плотности дислокаций от деформации при различных режимах нагружения



проведены с помощью методики пьезополимерного датчика давления (ПВДФ-датчик). Показано, что при амплитудах нагружающих давлений менее 4 ГПа фазовое превращение носит незавершенный характер. В результате этого материал представляет собой смесь  $\gamma$  и  $\alpha$  фаз и имеет аномальные свойства. В частности, скорость звука в фазе нагружения обратно про-

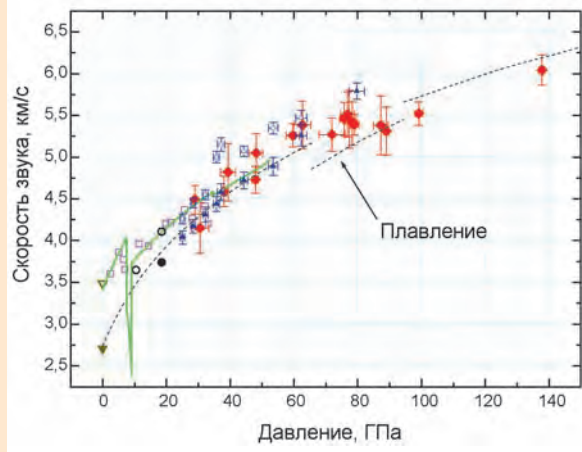
порциональна давлению, что приводит к образованию волны сжатия. В фазе разгрузки ситуация обратная, и формируется ударная волна разрежения, что указывает на быструю релаксацию нестабильного состояния материала. С использованием подхода, основанного на представлении детонационного процесса как непрерывного цикла химико-термодинамических

превращений ВВ и связывающего функционально значения детонационных параметров в пике Неймана с параметрами в плоскости Чепмена–Жуге, построены «холодные» (неискаженные химической реакцией разложения)  $D-U$ -соотношения тротила, гексогена, ТЭНа, тетрила, октогена и нитрометана до давлений, отвечающих пику Неймана детонационной волны.



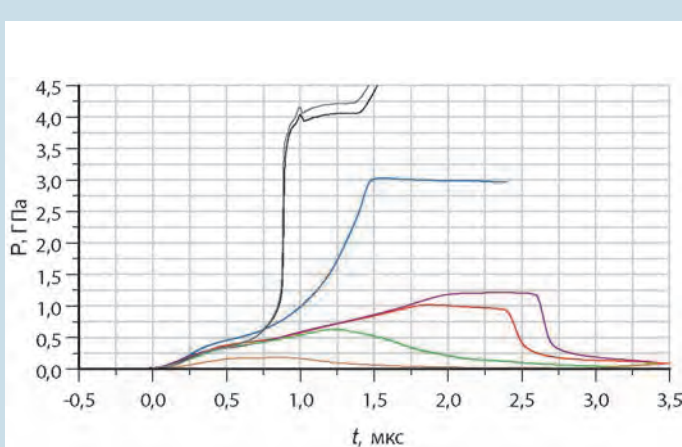
Зависимость скорости звука в цери от давления ударного сжатия:

- расчет по УРС ВНИИЭФ;
- ▲ – объемная скорость звука (оптический метод);
- , ○ – объемная и упругая (продольная) скорости звука (манганин);
- – упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод, ВНИИЭФ);
- – объемная скорость звука из «Справочника по редким металлам», 1965 г.

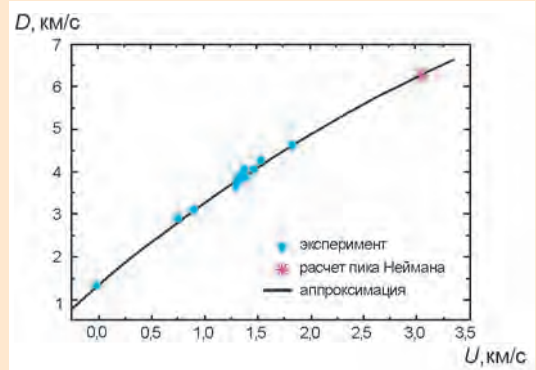


Зависимость скорости звука в олове от давления ударного сжатия:

- ▽ – ультразвуковой метод, ВНИИЭФ;
- – лазерный интерферометр [Martinez E. и др.];
- , ● – манганин;
- △, ▲ – VISAR [Jianbo Hu и др.];
- ◆ – оптический метод;
- ▼ – «Справочник по редким металлам», 1965 г.;
- расчет по УРС [Сох G. A.];
- - - - - расчет по УРС [ИТЭС]



Зависимость давления от времени в цери для разных условий нагружения

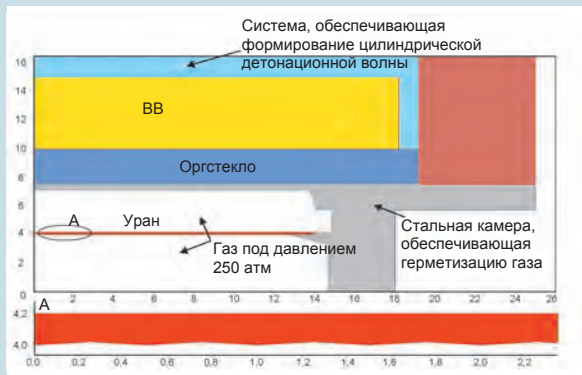


$D-U$ -соотношение и точка, отвечающая состоянию пика Неймана для нитрометана ( $D$  – скорость ударной волны;  $U$  – массовая скорость)

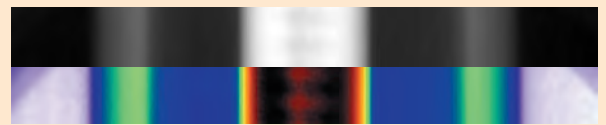
Завершен цикл экспериментов по исследованию упругопластических свойств природного урана в области давлений 250–300 ГПа методом возмущений на цилиндрическом нагружающем устройстве. Рост возмущений, предварительно нанесенных на внутреннюю поверхность урановой оболочки, регистрировали методом двухкадровой импульсной рентгенографии. При детонации ВВ оболочки осесимметрично сходятся к центру. По мере схождения во внутренней

полости газа растет давление. С некоторого момента урановая оболочка испытывает торможение. В этот период возмущения на внутренней поверхности начинают интенсивно развиваться. Скорость роста возмущений зависит от прочностных свойств материала, в данном случае урана. В эксперименте рентгенографическим методом регистрировали положение границ оболочек и возмущений на определенных моменты времени. Последующим математическим

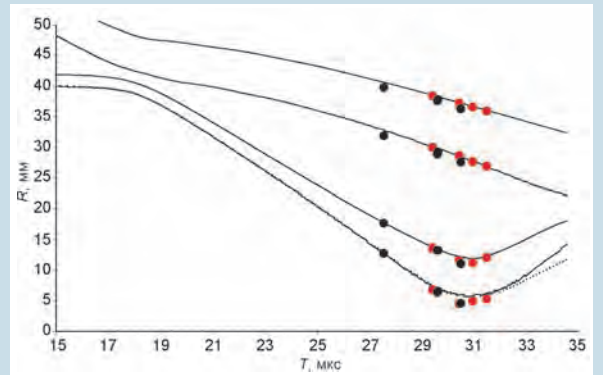
моделированием модели прочности верифицировали. Анализ экспериментов показал, что упругопластическое поведение урана в данном диапазоне давлений сложное и не описывается существующими моделями прочности. В частности, сдвиговая прочность урана при таком режиме деформирования значительно ниже, чем в расчетах. Возможно, это объясняется эффектом временного ударно-волнового разупрочнения, ранее наблюдавшегося в меди и алюминии.



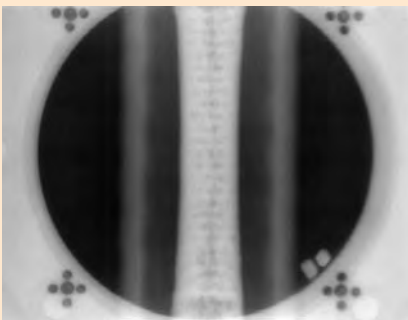
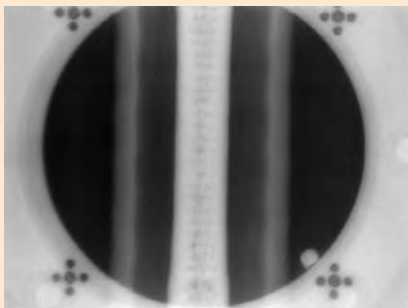
Принципиальная схема экспериментального устройства для исследования прочности



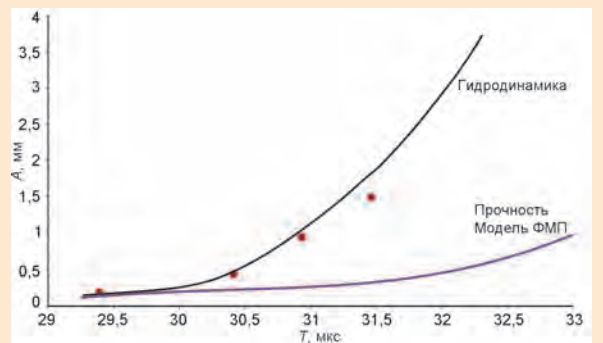
Результат математической обработки участка рентгенограммы для трассировки границ и определения амплитуды возмущений



Временная диаграмма движения стальной и урановой оболочек. Экспериментальные точки и расчетные зависимости

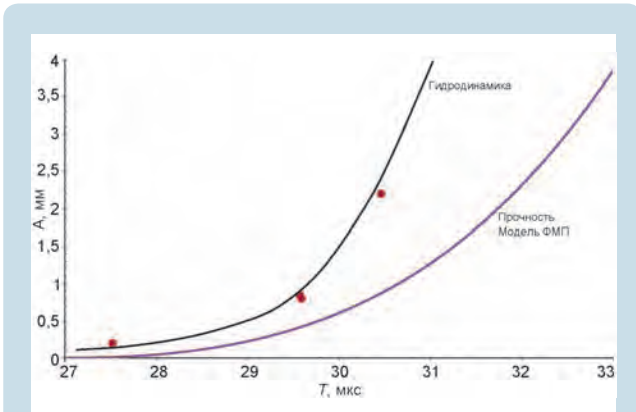


Рентгенограммы сходящейся к центру оболочки, полученные на комплексе 2БИМ234.500 на разные моменты времени

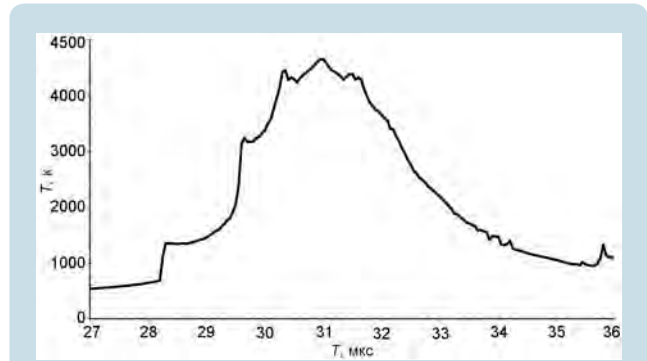


Развитие возмущений в случае начальной амплитуды  $A_0 = 0,1$  мм. Экспериментальные точки и расчетные зависимости

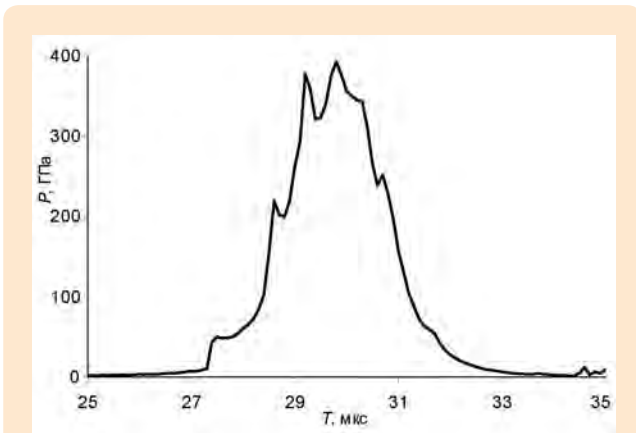




Развитие возмущений в случае начальной амплитуды  $A_0 = 0,25$  мм. Экспериментальные точки и расчетные зависимости



Зависимость температуры урана от времени в зоне возмущений

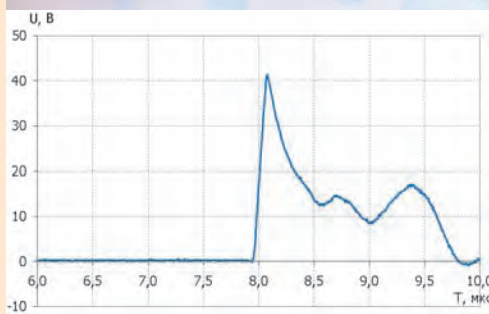


Зависимость давления от времени в уране в зоне возмущений

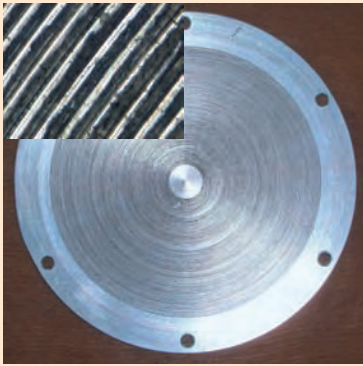


Разработан ряд конструкций пьезокерамических датчиков ударных и детонационных волн, работающих в области давлений от 0,1 до 100 ГПа. Применение новых подходов позволило существенно улучшить их метрологические характеристики, уменьшить размеры и приспособить для использования в сложных условиях взрывных экспериментов.

Методом пьезоэлектрического датчика измеряют параметры малоплотных высокоскоростных потоков пыли, выбрасываемых с поверхности ударно-нагруженных пластин. Разработанный метод может использоваться в исследованиях свойств материалов на внутренних и внешних полигонах ВНИИЭФ.

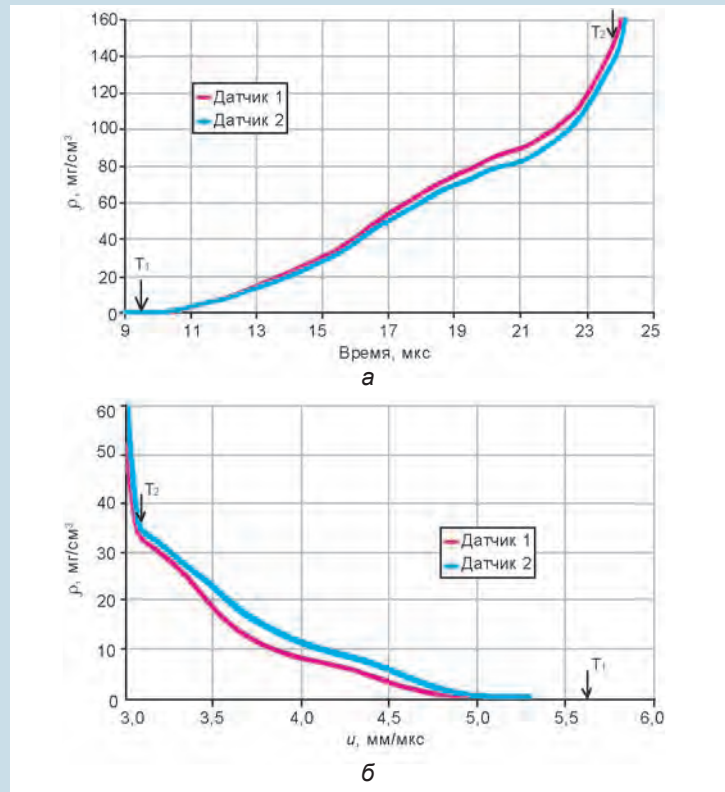


Пьезокерамические датчики ударных волн



Алюминиевая пластина – источник пыли

Разработана установка для резки изношенных автомобильных шин, в том числе и крупногабаритных, на части, пригодные для дальнейшей переработки. Установка перевозится на места скопления изношенных шин в разобранном состоянии и монтируется на месте. Для работы установки не требуется электроэнергия. Принцип действия основан на разгоне режущего модуля продуктами взрыва, локализованного во взрывной камере. Рабочее движение режущего модуля происходит снизу вверх, что обеспечивает его возврат в исходное положение под действием силы тяжести после срабатывания. В установке используется дешевое промышленное ВВ типа аммонита, применяемое в горнорудной промышленности. В зависимости от конфигурации режущего модуля возможны различные варианты фрагментов шины. В апреле 2008 года на Международном салоне изобретений, новой техники и товаров, в Женеве (Швейцария) разработке присуждена золотая медаль.



Распределение плотности пыли в зависимости от времени (а) и скорости (б) частиц при давлении ударного нагружения  $P_{Ai} = 35 \text{ ГПа}$



Диплом



Установка для резки изношенных автомобильных шин



Фрагменты шин

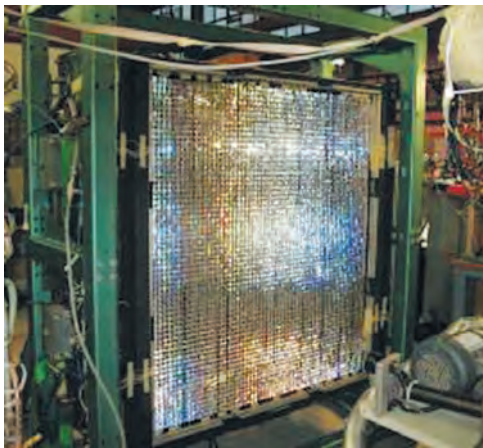


## ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

В рамках международного сотрудничества РФЯЦ-ВНИИЭФ участвует в эксперименте ALICE по изучению кварк-глюонной плазмы на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе (Швейцария, Франция). В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны и изготовлены высокоточный механический спектрометр фотонов PHOS, технология сборки детектирующей части, автоматизированные системы охлаждения, медленного

контроля и термостабилизации. В 2008 году завершена сборка первого модуля спектрометра, в составе большой международной коллаборации проведена его тестовая калибровка на Cosmic rays. Модуль с системой охлаждения установлен в шахту на место эксперимента. 10 сентября 2008 года произведен пуск ускорителя БАК. Спектрометр в составе первого модуля, систем его охлаждения, медленного контроля

и термостабилизации работал в непрерывном режиме в течение нескольких месяцев. Проведены первые измерения космических частиц, проходящих через спектрометр, и частиц, рождаемых при ускорении пучка в БАК в натуральных условиях, при интеграции спектрометра во все измерительные системы эксперимента. На первом этапе измерения проводились при стабилизированной температуре  $+17^{\circ}\text{C} (\pm 0,1^{\circ}\text{C})$ .



а



б

Спектрометр фотонов PHOS: а – матрица кристаллов первого модуля спектрометра; б – спектрометр внутри магнита L3 эксперимента ALICE

## ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

Одним из перспективных способов увеличения яркости лазерного излучения (ЛИ) является применение устройства, в котором суммируется излучение нескольких одинаковых модулей лазерных усилителей. В случае, когда удастся сфазировать излучение отдельных модулей, предельная расходимость излучения такой системы определяется дифракцией на суммарной апертуре, а энергия – суммарной энергией отдельных усилитель-

ных модулей. Наиболее эффективным способом фазировки излучения нескольких лазерных модулей является использование эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) с помощью вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ). Для реализации фазировки световых пучков различных излучателей они должны рассеиваться на общей гиперзвуковой решетке в активной к ВРМБ среде. Это достигается

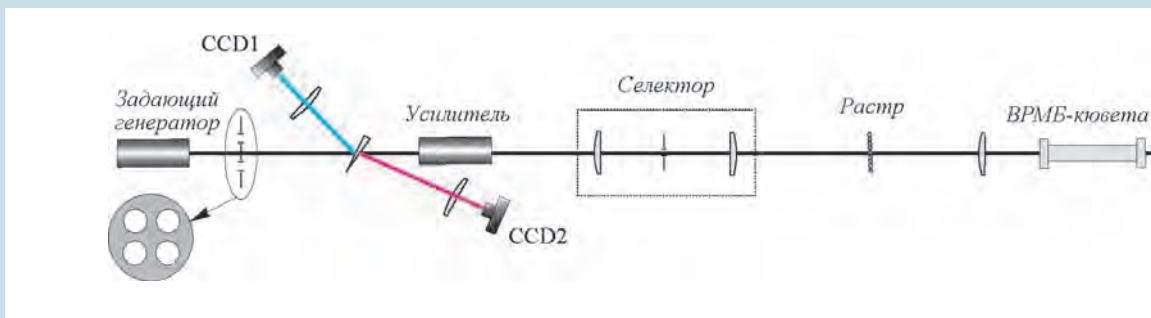
перемешиванием отдельных пучков в ВРМБ-среде, осуществить которое можно совместной фокусировкой излучения в объем взаимодействия. При ВРМБ в сфокусированных пучках наибольший инкремент достигается в каустике фокусирующей линзы (системы), поэтому фокусировка отдельных пучков в общую каустику является наиболее эффективным способом фазировки отдельных пучков. На лабораторном импульсном

неодимовом лазере проведены экспериментальные исследования фазировки четырех лазерных пучков в условиях нестационарного ВРМБ. Опорное излучение, состоящее из четырех отдельных пучков, пройдя через усилитель и угловой селектор, фокусировалось в ВРМБ-кювету. Система фокусировки содержала растр из дифракционных линз Френеля и фокусирующую линзу. Активной ВРМБ-средой служила смесь газов Хе и  $SF_6$ . Отраженное из кюветы излучение стоксовой компоненты ВРМБ возвращалось в усилитель на обратном проходе. В случае реализации режима фазировки угловое распределение усиленного стоксова излучения должно совпадать с угловым распределением опорного пучка на входе в усилитель. Экспериментально сравнива-

лись распределения в дальней зоне излучений опорного пучка, усиленного стоксова излучения и опорного излучения, дважды прошедшего через усилитель (ВРМБ-зеркало заменялось диэлектрическим). Показано, что лучшие результаты по фазировке получаются в условиях, когда в схеме фокусировки пучков в ВРМБ-кювету применяются киноформные линзовые растры с параметрами:  $f_r = 50$  мм и  $d_r = 0,5$  мм. Пучки опорного излучения фазировались в ВРМБ-кювету, и угловое распределение стоксова излучения, усиленного на втором проходе усилителя, практически совпадает с угловым распределением опорного излучения. Использование в двухпроходном усилителе фазировки с помощью ВРМБ-зеркала позволяет повысить долю энергии в пятне облучения до 66 % по сравне-

нию с 23 % в случае отсутствия фазировочного устройства.

Эффективность применения источников лазерного излучения в значительной степени зависит от качества волнового фронта, так как оно определяет возможность наведения лазерного луча на объект воздействия с малыми угловыми размерами. Факторы, искажающие волновой фронт, по своей природе имеют как статический характер (они возникают при распространении излучения через оптические элементы), так и динамический характер (при распространении излучения по приземному слою атмосферы). Одним из способов компенсации искажений волнового фронта является применение адаптивной системы фазового сопряжения, состоящей из датчика волнового фронта, деформируемого зеркала и системы управления.



Принцип фазировки лазерных пучков в условиях нестационарного ВРМБ



а

б

в

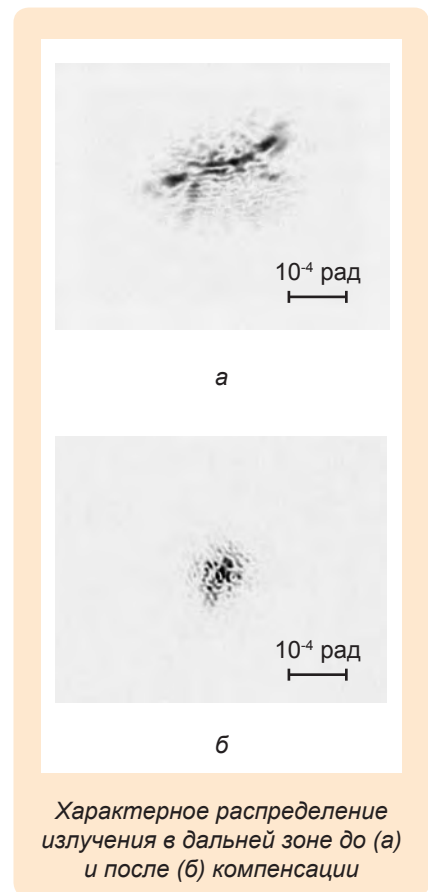
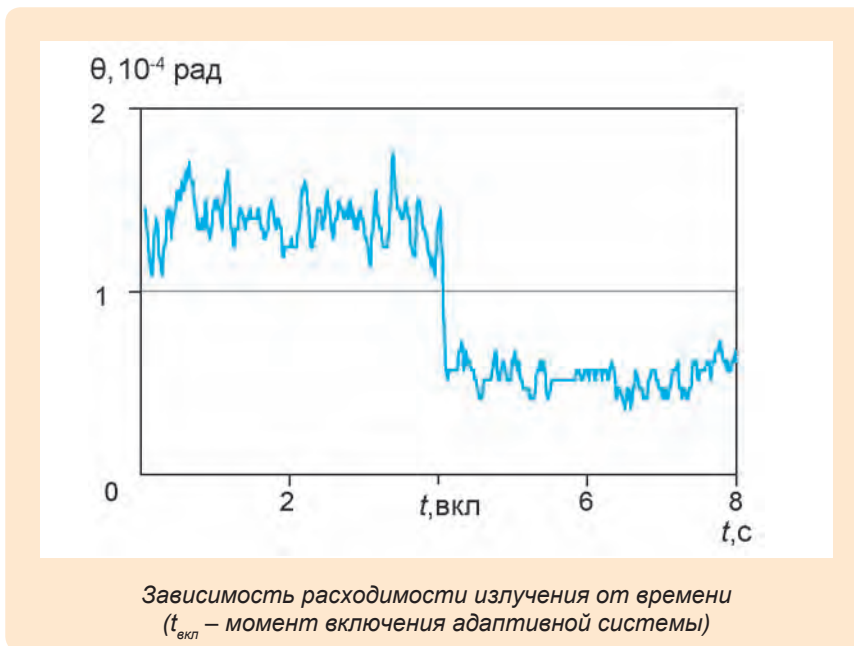
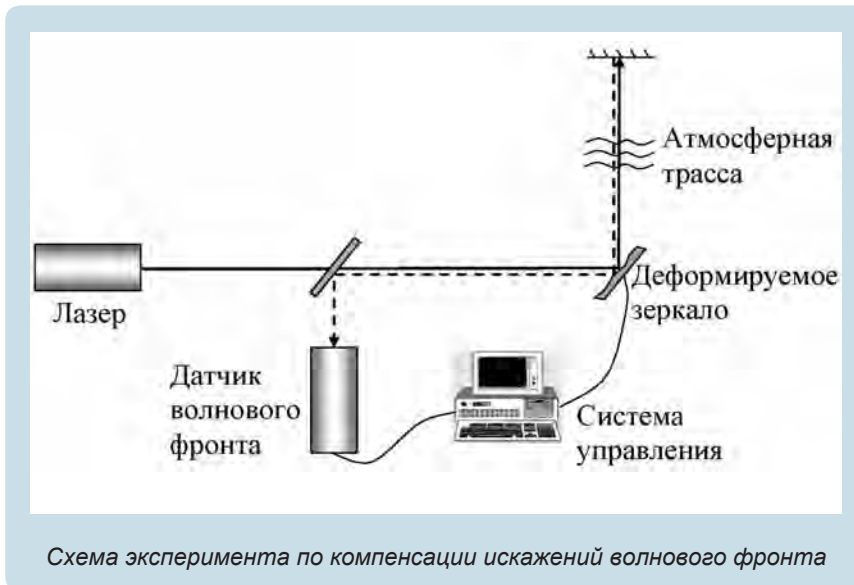
Распределение в дальней зоне излучений опорного пучка (а), опорного излучения, дважды прошедшего через усилитель (б), и усиленного стоксова излучения (в)



Был проведен эксперимент, задача которого состояла в уменьшении расходимости лазерного излучения апертурой 0,5 м, прошедшего через атмосферную трассу протяженностью 150 м. В эксперименте излучение непрерывного He-Ne лазера отражалось от деформируемого зеркала, проходило по приземной атмосферной трассе, отражалось от плоского зеркала, возвращалось и попадало на датчик волнового фронта. По измеренному волновому фронту рассчитывались сигналы коррекции для деформируемого зеркала. Плоскости деформируемого

зеркала и датчика волнового фронта являются сопряженными. В эксперименте использовались датчик волнового фронта Шака – Гартмана с 60 точками регистрации и биморфное деформируемое зеркало с 25 управляющими элементами. Сигналы коррекции подавались на деформируемое зеркало с частотой 12,5 Гц. Датчик волнового фронта состоит из киноформной фазовой пластины, в фокальной плоскости которой располагается CCD камера. Киноформная фазовая пластина представляет собой регулярный массив дифракци-

онных линз Френеля и изготавливается методом травления. Поверхность волнового фронта восстанавливается по взаимному расположению фокальных пятен на CCD камере. К обратной стороне деформируемого тонкого зеркала приклеены биморфные пьезоэлементы. Под действием электрического поля на отражающей поверхности зеркала формируются выпуклости или впадины, что позволяет управлять волновым фронтом ЛИ. Адаптивная система фазового сопряжения позволила улучшить расходимость ЛИ. Средняя расходимость, определяемая статическими искажениями волнового фронта за счет прохождения излучения через оптические элементы, была уменьшена в 3 раза с  $1,4 \cdot 10^{-4}$  рад до  $0,5 \cdot 10^{-4}$  рад при апертуре пучка 0,5 м. Динамическая составляющая расходимости, определяемая атмосферными флуктуациями волнового фронта, уменьшена в 2 раза с  $3,6 \cdot 10^{-5}$  рад до  $1,8 \cdot 10^{-5}$  рад.



Одно из ключевых направлений развития адаптивных оптических систем связано с коррекцией сцинтилляционных эффектов, возникающих в световом пучке при распространении света в неоднородной среде. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмов измерения (восстановления) и коррекции волнового фронта с винтовыми дислокациями, которые появляются в режиме сильных сцинтилляций. Среди рассмотренных подходов к восстановлению волнового фронта алгоритм Фрида является одним из лучших в плане точности, экономичности и устойчивости к шумам измерений. Алгоритм восстанавливает фазу по данным ее градиентов в присутствии оптических вихрей. Модификация этого алгоритма позволила увеличить его точность. Для проверки точности алгоритма и его эффективности в реальном эксперименте была генерирована торообразная мода Гаусса – Лагерра  $LG_0^1$  с использованием геликоидальных фазовых пластин, изготовленных из плавленного кварца по киноформной техно-

логии. Пластины имеют высокую лучевую прочность и рабочий диаметр 2 см. Экспериментальный стенд для комплексной регистрации оптических вихрей состоит из источника опорного излучения, интерферометра Маха – Цандера и датчика волнового фронта Гартмана – Шака, связанного с компьютером. Источник опорного излучения включает в себя He-Ne лазер 1, варьируемый ослабитель мощности 2 и коллиматор 3. Коллиматор формирует опорный гауссов пучок с плоским волновым фронтом диаметром около 1 см. Интерферометр состоит из двух клиньев 4 и двух плоских зеркал 6. В одно из плеч интерферометра вставляется геликоидальная фазовая пластина 5. После прохождения пластины гауссов пучок преобразуется в оптический вихрь (моду  $LG_0^1$ ) в фокальной области линзы 7, т. е. в дальней зоне, с высоким коэффициентом преобразования. Датчик волнового фронта состоит из матрицы ленточек 8 и CCD-камеры 11. При перекрытии опорного пучка во втором плече интерферометра CCD-камера регистрирует

распределение интенсивности излучения, при открытии опорного пучка регистрируется интерферограмма опорного пучка с вихревым пучком. Вихревой пучок имеет правильную торообразную форму. Фазовая поверхность оптического вихря реконструируется датчиком с программным обеспечением для восстановления сингулярных волновых поверхностей. Эксперименты показали возможность устранения фазовой сингулярности и повышения разрешающей способности оптической системы.

Проведен цикл исследований эффекта откола в алюминии при возбуждении в нем ударной волны (УВ) сверхкоротким импульсом ЛИ. Параметры ЛИ: длина волны 1,06 мкм; энергия импульса от 0,1 до 1 Дж, длительность 500 фс, диаметр пятна фокусировки от 400 до 600 мкм. Облучаемая лазером мишень в виде алюминиевой фольги толщиной 20, 50 и 100 мкм находилась в камере при вакууме  $10^{-4}$  торр. Фокусировка ЛИ осуществлялась параболическим зеркалом с фокусом 60 см. Интенсивность ЛИ варьировалась от  $10^{13}$  до  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. В экспериментах измеряли интенсивность ЛИ, соответствующую порогу возникновения откола. В мишенях толщиной 20, 50 и 100 мкм интенсивность соответственно составляла  $2,5 \cdot 10^{13}$ ;  $5,0 \cdot 10^{13}$  и  $1,4 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.

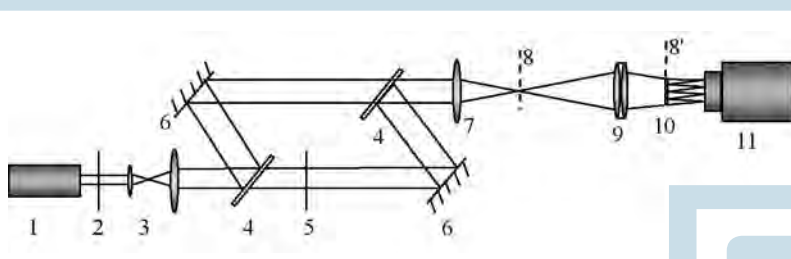
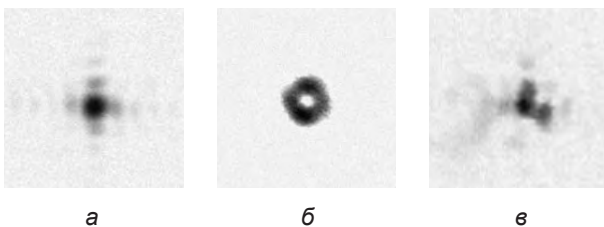


Схема регистрации вихря



Картинки в дальней зоне: исходный пучок (а), пучок до (б) и после коррекции (в)

**Расчетные параметры УВ в алюминии, возникающей при воздействии на его поверхность ЛИ длительностью 500 фс и интенсивностью  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>**

Глубина проникновения в алюминиевую мишень, мкм	20	50	100
Длительность импульса, нс	0,5	1,0	1,5
Амплитуда, кбар	280	180	112
Скорость, км/с	7,5	6,9	6,6

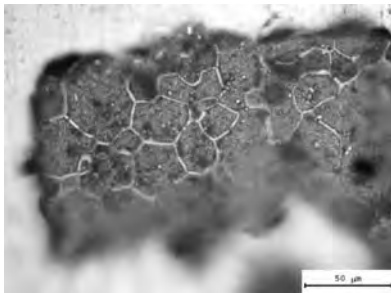


Видно, что на глубине 20 мкм длительность импульса УВ составляет 0,5 нс, что в 1000 раз превышает длительность импульса возбуждающего ее ЛИ. При скорости распространения 7,5 км/с УВ занимает в пространстве ~ 4 мкм. При отражении от тыльной поверхности мишени УВ трансформируется в волну растяжения, и при амплитуде, превышающей динамический порог прочности материала, возникают условия откола. Толщина слоя откола в экспериментах с 20-мкм мишенью, измеренная интерферометром белого света, составила 1,5 мкм. В фольге толщиной 20 мкм откол происходит с гладким разрывом зерен кристаллической структуры, а у фольги толщиной 100 мкм – по межзеренным границам. Учитывая, что расчетная амплитуда УВ в первом

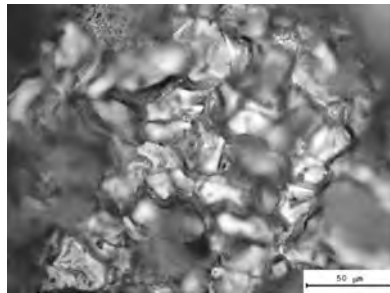
случае 140 кбар, можно предположить, что здесь реализовались условия откола, близкие к теоретическому пределу прочности алюминия, который оценивается в ~ 100 кбар. Динамические параметры откола регистрировались в экспериментах новой методикой измерений, использующей контактный зеркальный сенсор (КЗС). Это тонкая лавсановая пленка с зеркальным напылением, локально разрушающаяся от соприкосновения с фрагментами откола. КЗС освещался специальным зондирующим лучом, который после отражения регистрировался телекамерой. По характеристикам света, отраженного от КЗС, определяли размеры и скорость фрагментов откола, который представляет собой облако быстро летящих мелкодисперсных частиц. Чис-

ленная обработка фотографий контактного сенсора, сделанных с помощью ПЗС-матрицы телекамеры, позволяет получить распределение облака откола по размеру частиц и скорости их полета. Таким образом, в результате экспериментов показано, что при прямом воздействии на тонкие плоские мишени сверхкоротких лазерных импульсов длительностью 500 фс возможно возбуждение в них сильных УВ с длительностью ~ 1 нс, что позволяет изучать прочностные характеристики материалов в условиях, близких к их теоретическому пределу прочности.

В исследованиях по управляемому термоядерному синтезу используются полые сферические оболочки из стекла или полимера. Они служат в качестве баллона и толкателя при

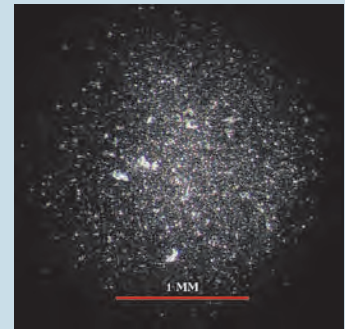


Толщина фольги 20 мкм

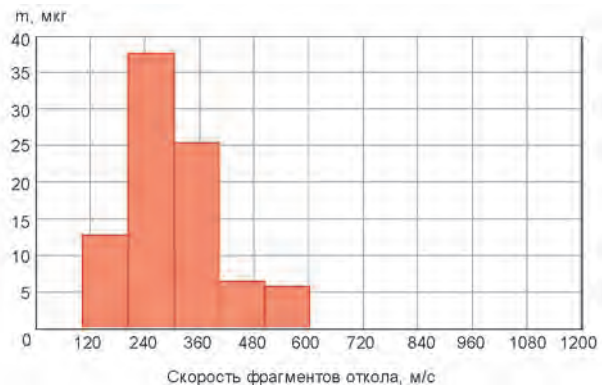
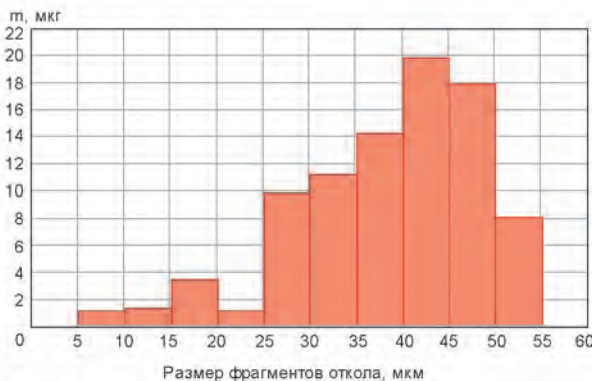


Толщина фольги 100 мкм

Фотографии поверхностей откола, полученные на металлографическом микроскопе. Длина масштабной линии – 50 мкм



Фотография контактного сенсора после взаимодействия с облаком частиц откола. Длина красной линии соответствует 1 мм



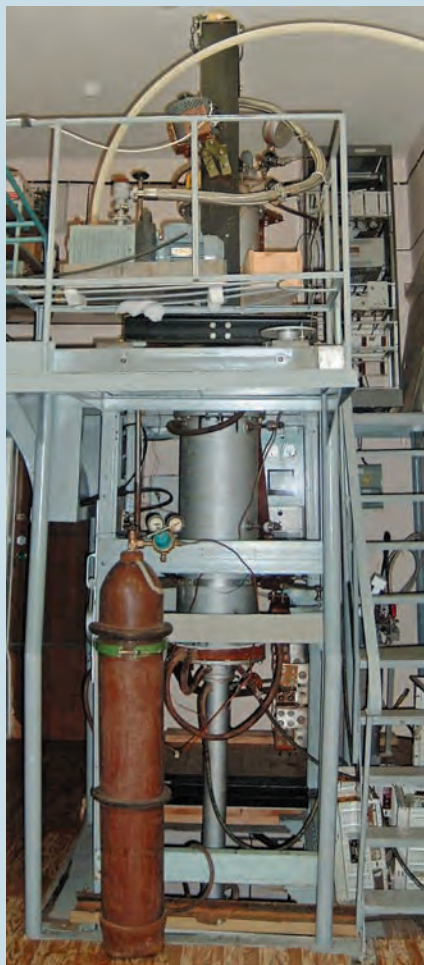
Распределение массы облака откола по размеру частиц и скорости их полета

сжатии смеси дейтерий-тритий (термоядерного топлива). Для изготовления таких оболочек сконструирована и изготовлена установка.

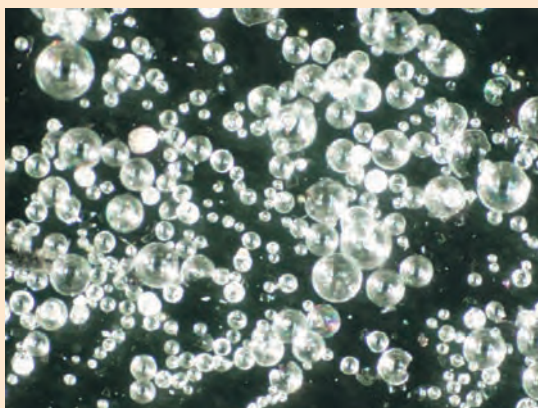
На установке «Искра-5» реализован режим работы, при котором на выходе установки

получается последовательность нескольких десятков мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности, следующих друг за другом через 10 нс. Цуг из 40 лазерных импульсов по уровню 0,15 имеет энергию до 300 Дж и длительность оди-

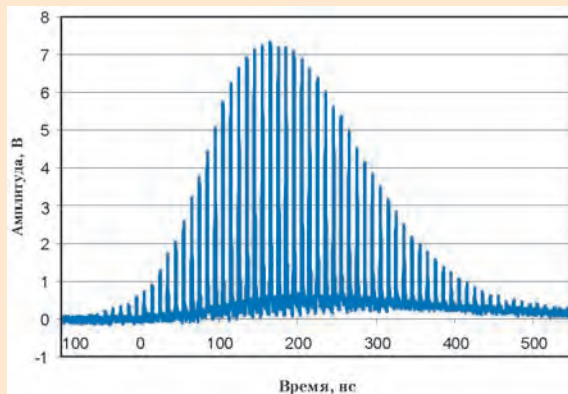
ночного импульса в цуге  $\approx 0,5$  нс. Выполнены эксперименты по конверсии цуга лазерных импульсов в цуг рентгеновских импульсов, который по форме огибающей и длительности одиночного импульса воспроизводит параметры лазерного цуга.



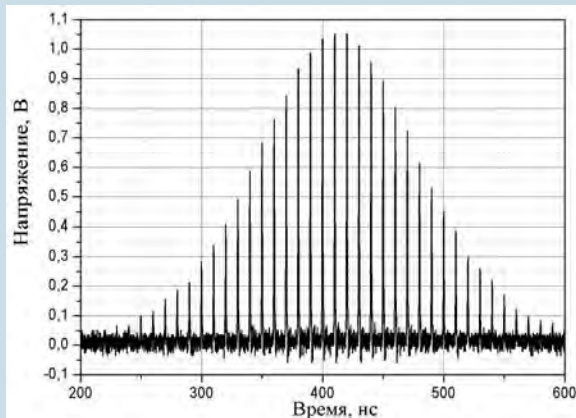
Установка для получения полых микросфер



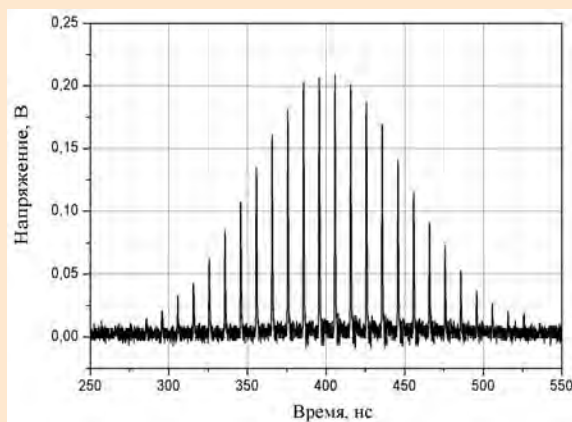
Микросферы



Осциллограмма цуга из 39 импульсов по уровню 0,15 с энергией 170 Дж



Осциллограмма цуга лазерных импульсов



Осциллограмма цуга рентгеновских импульсов



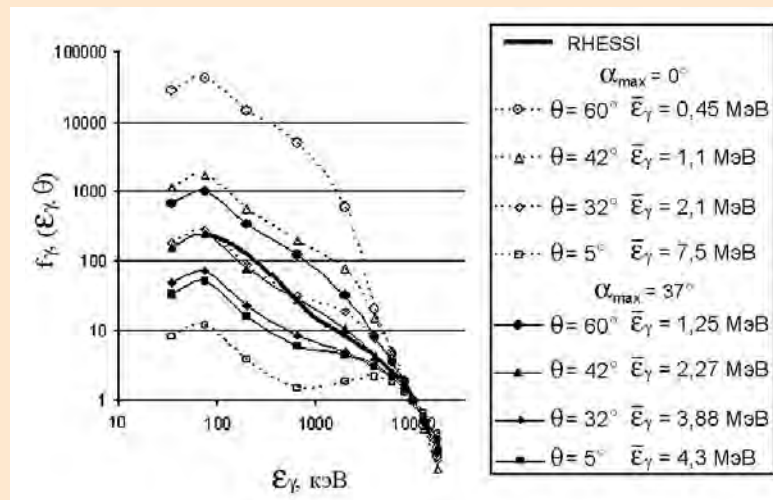
## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Исследовались гигантские восходящие атмосферные разряды (ВАР), инициируемые внутриоблачными разрядами обычной молнии, приводящими к малым вариациям дипольного момента облака  $\Delta M$ . Для сравнения с атмосферными вспышками  $\gamma$ -излучения, зарегистрированными с борта искусственных спутников Земли CGRO (1995 г.) и RHESSI (2005 г.), выполнено численное моделирование тормозного излучения релятивистских убегающих электронов и его транспорт в ближний космос. Вычисленные длительность  $\gamma$ -импульсов  $\Delta t_\gamma$ , число  $N_\gamma$  и спектр  $\gamma$ -излучения согласуются с данными наблюдений. Яркость  $\langle J \rangle$  и цвет оптической флуоресценции ВАР на относительно небольших высотах непосредственно над облаком соответствуют оптическим явлениям *Blue Jets*. На больших высотах (верхняя стратосфера – нижняя ионосфера), флуоресценция практически отсутствует. Результаты моделирования согласуются с опубликованным в США анализом представительной совокупности экспериментальных данных, полученных учеными США, Венгрии, Японии, Великобритании, Израиля. Согласно результатам анализа атмосферные вспышки  $\gamma$ -излучения связаны с наиболее распространенными на Земле внутриоблачными разрядами молнии и малыми  $\Delta M$  (в среднем 49 Кл·км) и в отличие от бытовавших представлений не коррелированы с явлениями *Red Sprites*, которые развиваются над крупномасштабными системами облаков и связаны с разрядами молнии на землю.

Разработана методика проектирования спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ), основанная на двумерном расчете распределения магнитных полей в генераторе. Это

Наблюдаемые и расчетные параметры атмосферных вспышек ( $Q_{cl}$  – заряд и  $H_{cl}$  – высота вершины облака)

$Q_{cl}$ , Кл	$H_{cl}$ , км	$\Delta M$ , Кл·км	$\Delta t_\gamma$ , мс	$\langle J \rangle$ , рэлей	$N_\gamma$	
					CGRO	RHESSI
35	10	70	1,8	50 600	172	264
30	10	60	2	28 000	69	108
Эксперимент			1–3	max 100 000	50–800	30–100



Зависимость спектра фотонов на высоте орбиты 500 км от угловой ориентации спутника относительно источника (разряда)  $\theta$  и угловой апертуры потока убегающих электронов  $\alpha_{max}$ . Высота источника  $z = 15$  км

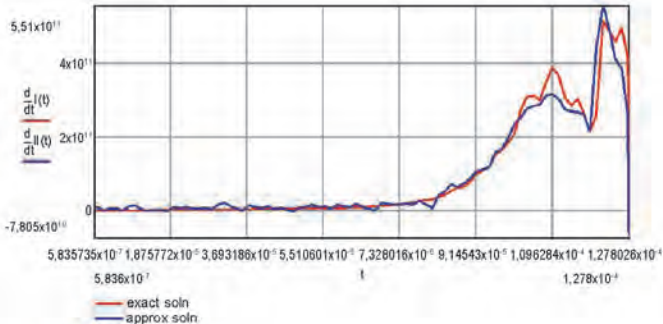
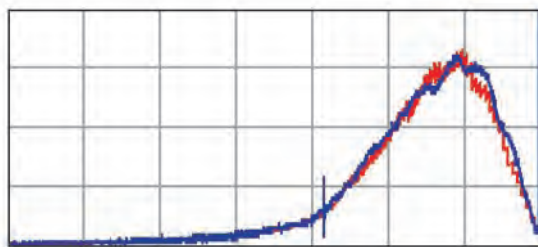
позволяет определять основные параметры работы СВМГ в любой момент времени. Рассчитываются напряжения и токи в витках спирали, изменение индуктивности генератора, потери магнитного потока в генераторе, осевые и радиальные движения витков, торможение трубы магнитным полем и др. Создана компьютерная программа расчета режимов работы СВМГ. Использование компьютерной программы позволяет легко менять начальные электрические и кон-

структивные параметры СВМГ и отображать основные характеристики работы генератора в процессе расчета. Методика проектирования оттестирована на большом числе экспериментальных данных, полученных в опытах с СВМГ. Следующим шагом стало применение методики для создания новых конструкций. Результаты, полученные в экспериментах с СВМГ, отличаются от расчетных не более чем на 5%. Использование методики позволило оптимизи-

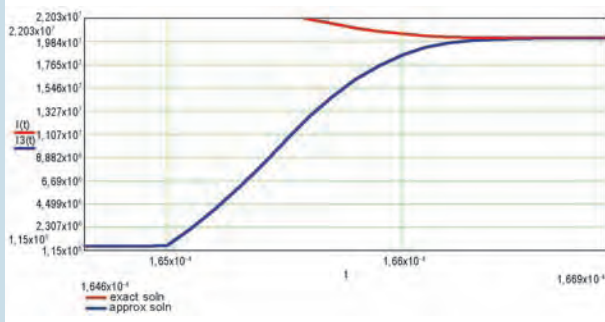
ровать параметры спиральных генераторов, что привело к разработке СВМГ с амплитудно-временными характеристиками, свойственными, скорее, дисковым взрывомагнитным генераторам. Планируется создать источник импульсной мощности на основе СВМГ, позволяющий получать в лайнерной нагрузке ток  $\sim 20$  МА за время  $\sim 1$  мкс. Новая методика проектирования

СВМГ позволила отказаться от предварительных экспериментов и таким образом существенно сократить как финансовые, так и временные затраты на разработку новых генераторов. Создание данной методики позволило довести технологию СВМГ до коммерческого продукта, востребованного ведущими научно-исследовательскими лабораториями мира.

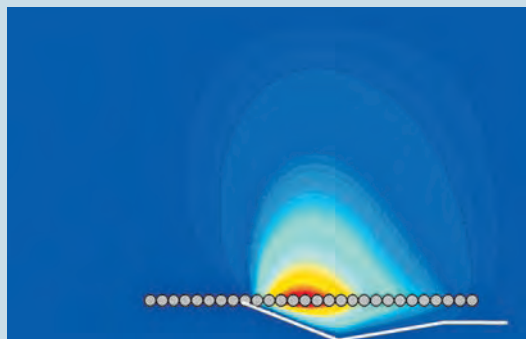
Проведены исследования нового сильнополярного диэлектрика – геля для заполнения промежутков между слоями пленочных изоляторов, применяемых в импульсной высоковольтной технике. Гель приготовлен на основе смеси сильнополярной жидкости – глицерина с желатином. По результатам исследований получено, что проводимость, диэлектрическая про-

СВМГ  $\varnothing$  200 ммСВМГ  $\varnothing$  240 мм

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых производной тока в СВМГ



Расчетный ток 20 МА/1 мкс



Распределение магнитного поля в СВМГ



нищаемость, время релаксации желатинированного глицерина сохраняются на уровне исходного продукта – глицерина. Электропрочность увеличивается на ~15% и составляет 87 кВ/мм при длительности импульса 4 мкс. Состав обладает клеящими свойствами, сохраняет эластичность

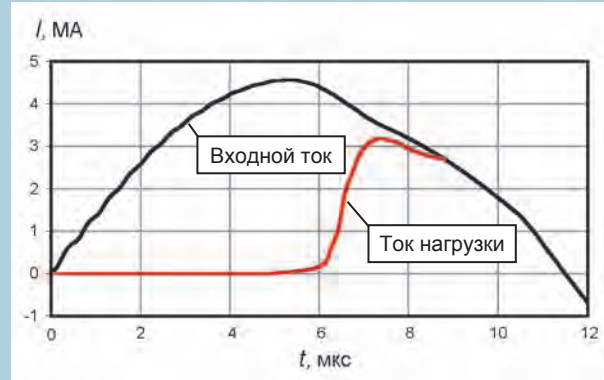
при отрицательных температурах (испытан при  $-28^{\circ}\text{C}$ ). Изоляторы, изготовленные с применением геля, обладают новыми свойствами, значительно облегчающими технологию работы с ними.

Сильноточный коммутатор-формирователь импульса тока (разработка электрофизического

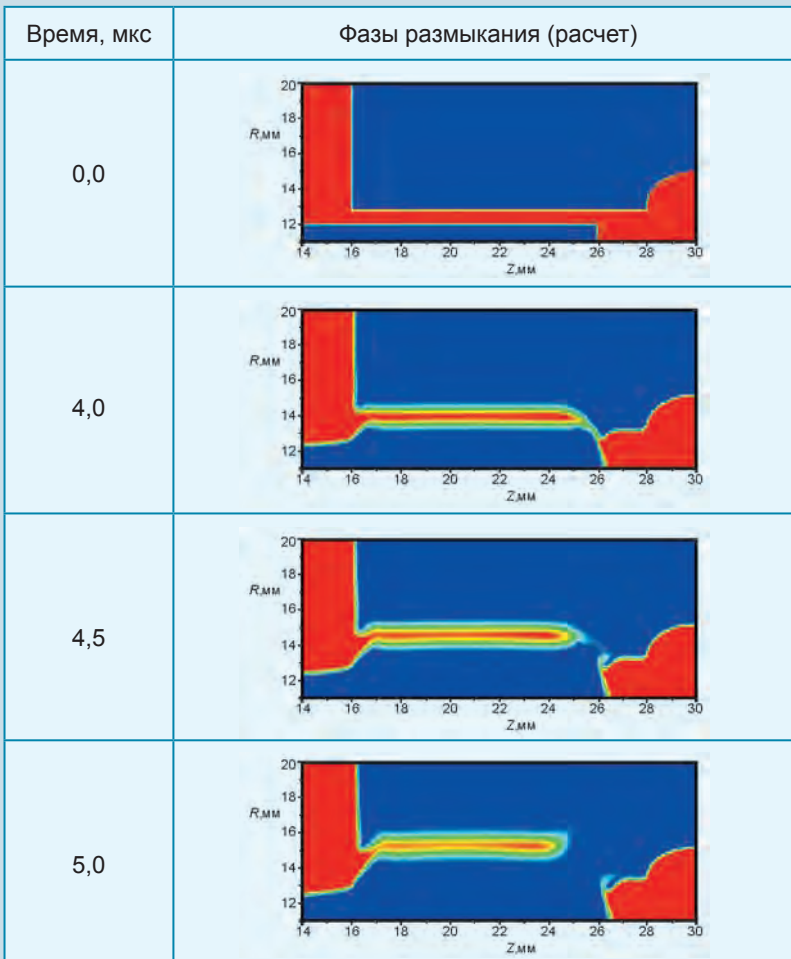
отделения) позволяет сокращать фронт нарастания мультимегамперных токов в 8–8,5 раза при их коммутации на малоиндуктивные нагрузки. В контрольном эксперименте ток амплитудой 4,5 МА с временем нарастания ~6 мкс был переключен в нагрузку индуктивностью 4 нГн за 0,7 мкс.



Глицерин в жидком и желеобразном состояниях

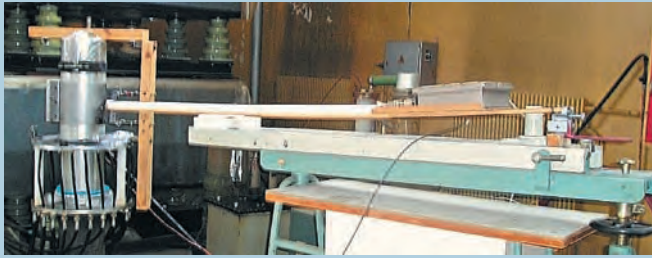


Токи (эксперимент)



Коммутатор

Совместно с конструкторскими и теоретическими отделениями выпущены методические материалы по лабораторному моделированию механического импульса с помощью электрического взрыва тонкой фольги. В лабораторных условиях в таких испытаниях динамика нагружаемого образца контролируется бесконтактным методом с использованием микроволнового интерферометра.



Испытание образца механическим импульсом от электрического взрыва фольги с бесконтактным измерением динамики образца

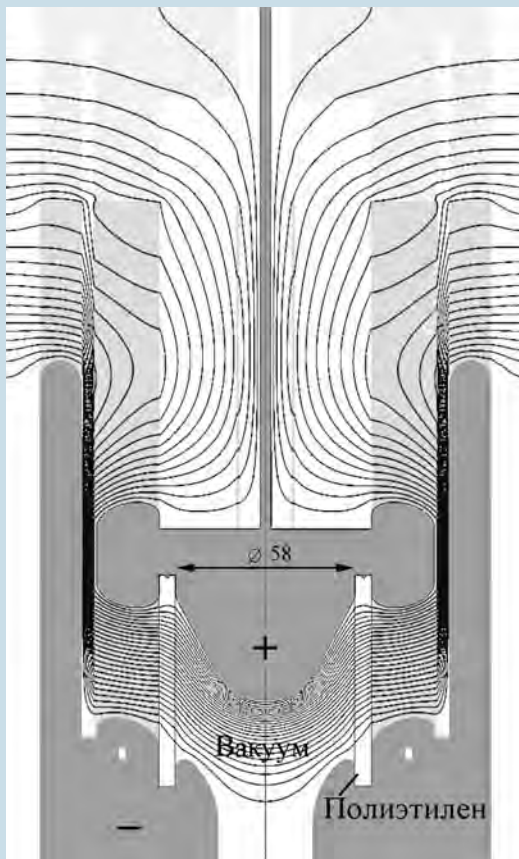


Индикаторная пластинка после газодинамического воздействия электрического взрыва алюминиевой фольги толщиной 6 мкм

Испытана новая конструкция вакуумного высоковольтного перехода. Переход или интерфейс от твердотельной изоляции к вакууму зачастую является наиболее слабым местом в электрофизических установках, определяющим их предельные возможности. Начиная с 1964 года, конструкция интерфейса при-

обрела практически стандартный вид – это изолятор, расположенный под углом 45 градусов по отношению к электродам. В последнее время появились публикации по результатам расчетов электростатических полей, возникающих в тройных точках интерфейса металл–диэлектрик–вакуум, и предложения по вне-

сению изменений в стандартное исполнение, позволяющих увеличить электропрочность перехода почти в полтора раза. Основная идея изменений – вынести тройные точки в область слабых электрических полей. В отделении разработан высоковольтный интерфейс от тонкостенной пленочной цилиндрической изоляции в вакуум, реализующий новый подход. Геометрия электродов и система изоляторов тщательно подобраны для выравнивания электрических полей по поверхности раздела изоляторов и минимизации полей в тройных точках. Подбор геометрии осуществлялся по программе расчета электростатических полей. Экспериментальная модель перехода, спроектированная на напряжение 400 кВ, прошла испытания напряжением 510 кВ при длительности импульса 4 мкс.



Электрические поля в испытательной сборке в эквипотенциальных линиях



Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности раздела в вакууме и полиэтилене при напряжении на сборке 400 кВ



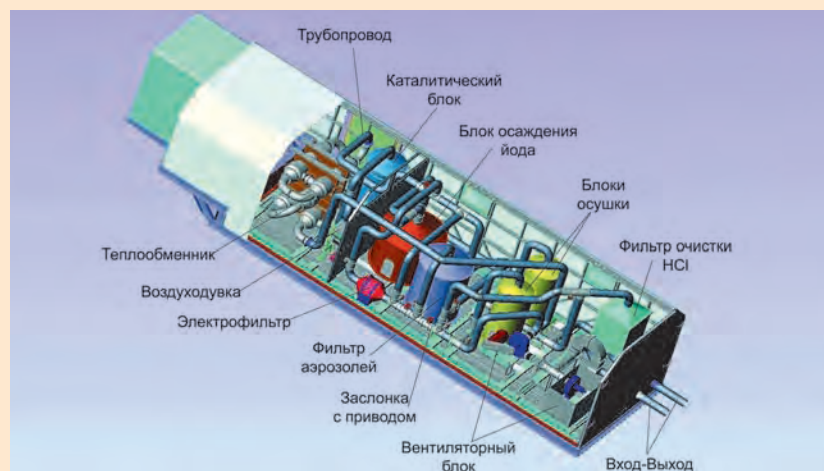
## КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

Разработана передвижная мобильная автоматизированная установка газоочистки (МАУГОС), работающая по принципу рециркуляции воздуха, который предполагает создание замкнутого технологического цикла движения воздуха по схеме «отсос – очистка – возврат в помещение». Основным составляющим МАУГОС является технологическое оборудование, в состав которого входят вентиляторный блок для создания потока воздуха, блоки осушки, фильтр очистки паров соляной кислоты, блок осаждения трития, состоящий из каталитического блока и теплообменника, фильтр аэрозолей – фильтр грубой очистки, электрофильтр – фильтр тонкой очистки, блок осаждения йода, приспособление для присоединения технологического оборудования к очищаемому помещению (шлюз), комплекс воздухопроводов, запорная электромеханическая арматура и аппаратура контроля и управления. Контроль параметров воздуха на входе и выходе установки, а также управление технологическим процессом очистки осуществляются с помощью автоматизированной системы управления с постоянным выводом информации на центральный пункт управления.

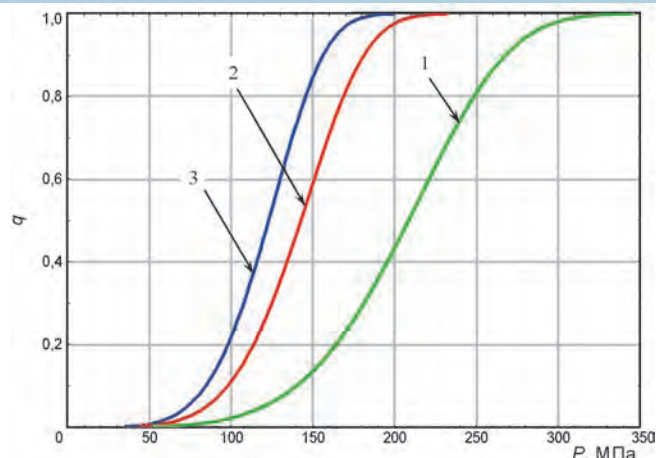
Теоретически показано влияние площади контакта детали из ВВ со смежной металлической деталью на давление, приводящее к взрыву при ударном сдвиге на 1–2 мм. С увеличением площади контакта «ВВ – смежная деталь» уменьшается среднее давление, приводящее к взрыву ВВ. Результаты экспериментально подтверждены испытаниями образцов ВВ на основе октогена диаметром 10, 20 и 25 мм. Показано, что давление, приводящее к взрыву ВВ при ударном сдвиге, описывается распределением Вейбулла с параметром смещения, равным



Мобильная установка МАУГОС



Технологическое оборудование МАУГОС



Распределение вероятности давления, приводящего к взрыву ВВ, для навесок с диаметрами: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 25 мм

нулю, т. е. даже при малом давлении прижатия ВВ к металлической детали и сдвиге смежных деталей возможен взрыв ВВ.

Разработано взрывное метательное устройство (ВМУ), использующее эффект маховой детонационной волны.

Изготовлен цифровой стереопост для аэробаллистического тира (АБТ) на базе четырех цифровых фотокамер «Сапог», проведена адаптация этих камер к условиям применения в АБТ-2. Внедрение цифрового стереопоста в практику испытаний на многоцелевом испытательном комплексе ВНИИЭФ позволит повысить точность измерений в 1,5–2,0 раза, а также ускорит, упростит и удешевит процесс обработки опытной информации за счет ликвидации в технологическом процессе операций по фотохимической обработке пленок.

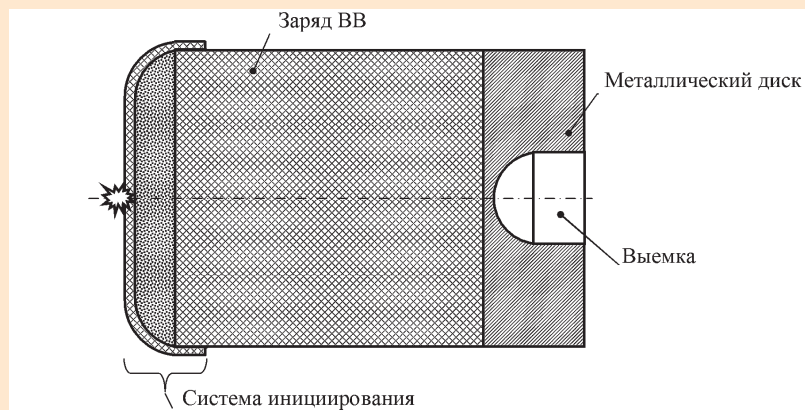
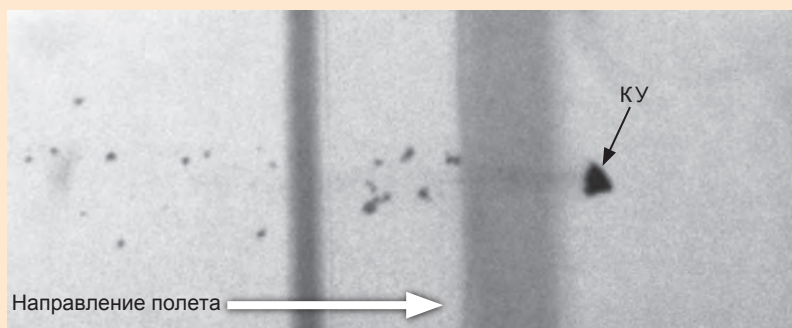


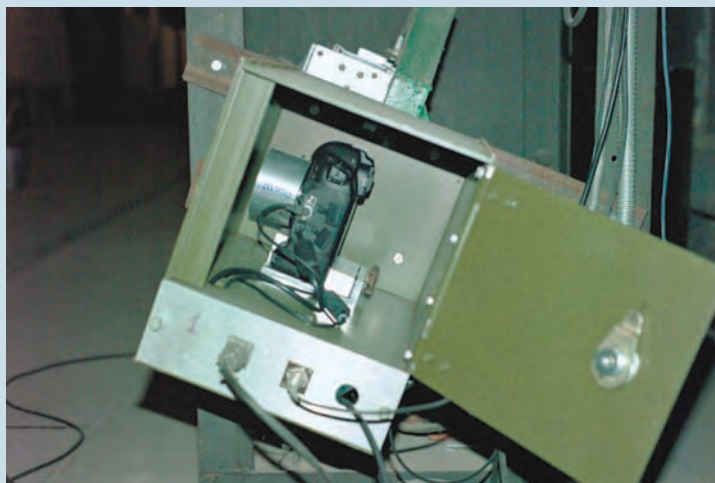
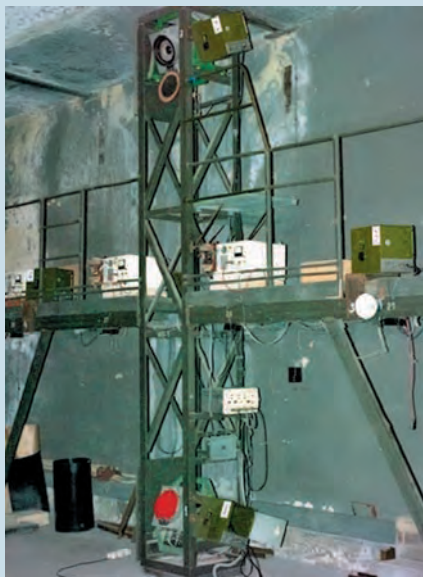
Схема ВМУ



Фотография ВМУ



Рентгенограмма стального компактного ударника



Экспериментальный цифровой стереопост и боксы для размещения фотокамер





Фрагменты регистрации в баллистических экспериментах

## ОТДЕЛЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отделение активно проводит радиобиологические исследования по двум направлениям:

- оценка отдаленных последствий действия ионизирующих излучений различного вида на организм человека;

- разработка средств и методов защиты от поражающего действия ионизирующих излучений на основе низкочастотного импульсного магнитного поля.

Отдаленные последствия радиационного поражения генома специалистов ядерного оружейного комплекса (ЯОК) оценивали с помощью комплекса современных молекулярно-генетических методов, предусматривающих реконструкцию поглощенных доз по частоте стабильных и нестабильных хромосомных aberrаций в клетках крови. Разработаны собственные калибровочные кривые и выпущены методические рекомендации по использованию цитогенетических методов для биологической дозиметрии. Уникальность исследований заключается в редкой возможности изучать радиационное поражение генома специалистов ЯОК, работавших с определенным видом излучений, и их потомков спустя несколько десятилетий после облучения. Кроме того, современные методы позволяют усовершенствовать подходы для

выделения групп риска возникновения различных заболеваний.

Разработка новых методов защиты от поражающего действия ионизирующих излучений является

актуальной задачей, поскольку практическое использование имеющихся методов фармакологической защиты ограничено их высокой токсичностью, временем

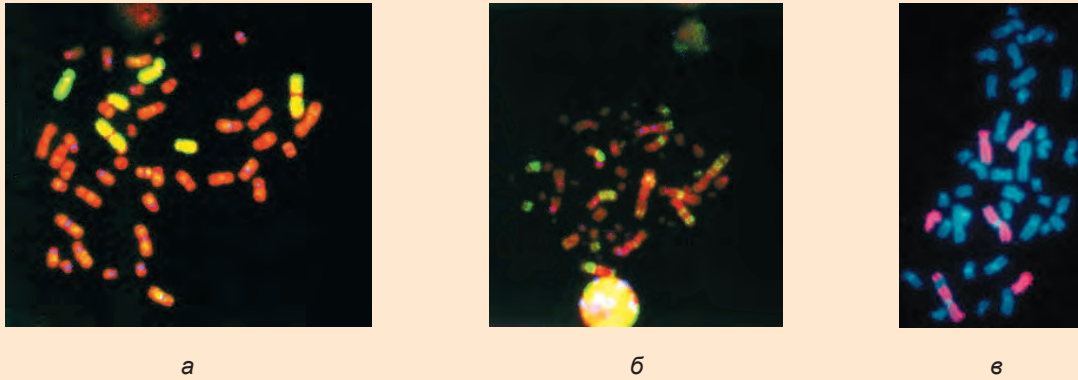


а



б

Основные типы хромосомных aberrаций (классический цитогенетический анализ): а – дицентрическая хромосома с ацентрическими фрагментами; б – дицентрическая и кольцевая хромосомы с сопутствующими ацентрическими фрагментами



Метафазы, окрашенные по методу FISH, ДНК пробы для хромосом 1, 4 и 12 и панцентромерные пробы: а – «нормальная» клетка; б – клетка с множественными транслокациями; в – инсерция

действия, необходимостью введения в организм в субтоксичных дозах, малой эффективностью при облучении в сверхлетальных дозах. В качестве нового способа радиационной защиты предложено использовать низкочастотное импульсное магнитное поле (ИМП) с максимальной магнитной индукцией до 3,5 мТл, параметры которого базируются на согласованности огибающих

спектров сигнала и закономерностей флуктуации сердечного ритма человека. Экспериментально доказано, что воздействие ИМП на здоровый необлученный организм безопасно, поскольку не приводит к отклонениям функций организма от нормы и не вызывает побочных эффектов (даже при многократном действии). Основными преимуществами использования ИМП является

его эффективность при разных видах и интенсивностях излучения в широком диапазоне доз от 2 до 13 Гр, вызывающих различные формы лучевого поражения (костно-мозговую, смешанную и кишечную). Кроме того, показана эффективность применения ИМП не только до облучения, но и в пострадиационный период. Метод защищен тремя патентами и заявкой на изобретение РФ.



Общая структура исследований по изучению радиопротекторного действия низкочастотного ИМП



**Влияние магнитного поля на животных, не подвергавшихся радиационному облучению**



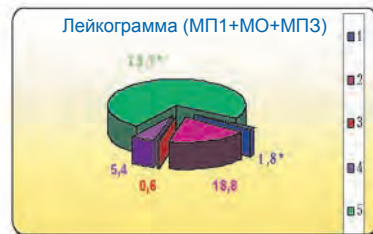
1 – Воздействие магнитным полем; 2 – контроль



1 – Воздействие магнитным полем; 2 – контроль



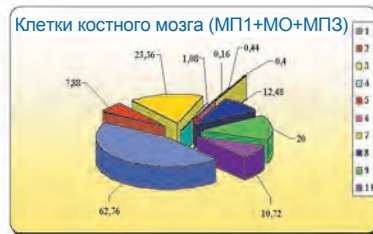
1 – Палочкоядерные; 2 – сегментоядерные; 3 – эозинофилы; 4 – моноциты; 5 – лимфоциты



1 – Воздействие магнитным полем; 2 – контроль



1 – Гранулопозз; 2 – нейтрофильные миелоциты; 3 – сегментоядерные нейтрофилы; 4 – эозинофилы; 5 – миелоцитарные; 6 – юные эозинофильные клетки; 7 – эозинофильные миелоциты; 8 – лимфоциты; 9 – общие эритробласты; 10 – полихроматофильные нормобласты





# 2008