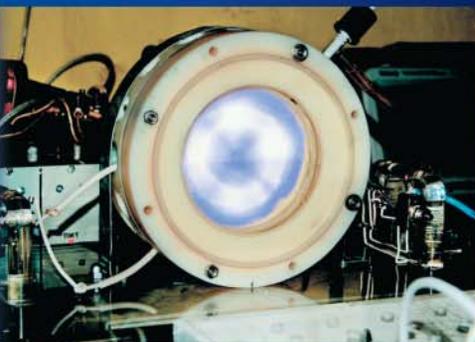


# ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ



РФЯЦ-ВНИИЭФ

# 2010



САРОВ  
2011

# ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЯЦ-ВНИИЭФ

[www.vniief.ru](http://www.vniief.ru)

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:

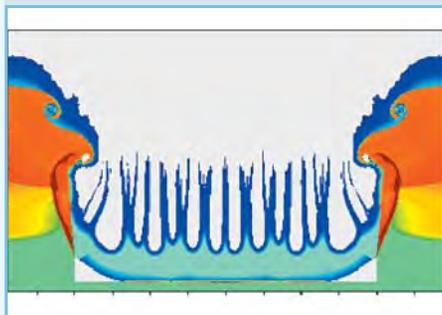
- по телефону 8(83130) 7-75-94 или 7-75-84
- по электронной почте [kul@otd68.vniief.ru](mailto:kul@otd68.vniief.ru)



## СОДЕРЖАНИЕ

2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



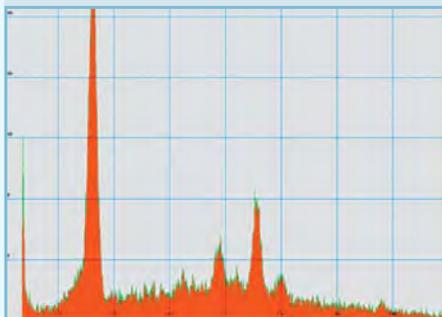
11

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА



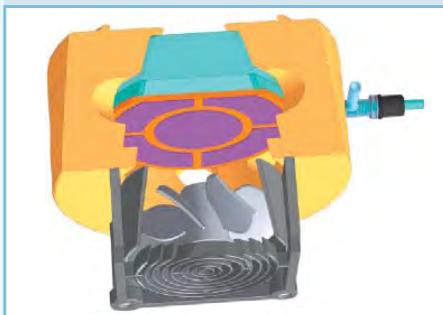
20

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



22

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ



27

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



23

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ  
ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ



28

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО



25

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



**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 Н. В. Завьялов  
д-р физ.-мат. наук А. В. Ивановский  
Е. В. Куличкова  
д-р техн. наук А. Л. Михайлов  
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

Подписано в печать 22.02.2011 г. Формат 60x84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,7. Уч.-изд. л. 3,6.  
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 111-2011.  
Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23



## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Основным направлением деятельности ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ является создание современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов в задачах механики сплошных сред и физики высоких плотностей энергии, а также в других задачах, входящих в тематику деятельности ВНИИЭФ.

В 2010 году активно развивались математические методики и алгоритмы для повышения точности и эффективности численного моделирования сложных физических процессов в задачах механики сплошных сред. Для конечно-разностных схем лагранжевой газовой динамики, построенных последовательным вариационным методом, доказано сохранение фазового объема и каноничности (гамильтоновости).

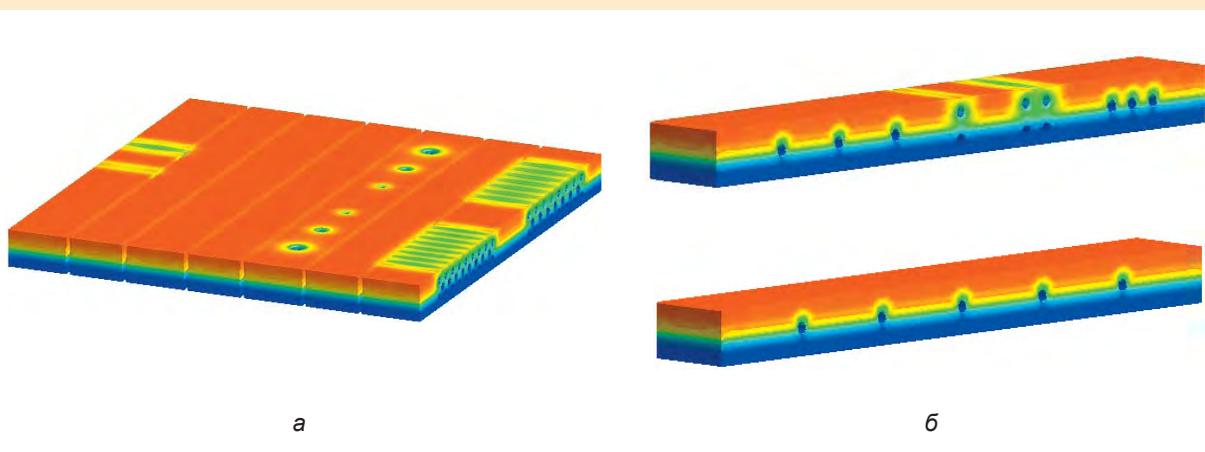
С целью повышения эффективности многопроцессорного счета в комплексе программ ЛЭГАК-3D реализован аппарат динамической балансировки вычислительной нагрузки на процессоры во время счета задачи, перераспределяющий счетные точки с процессора на процессор. Ранее реализован-

ная статическая балансировка не в полной мере учитывала неоднородности рассчитываемых систем по вычислительной нагрузке и перемещение вычислительной нагрузки по системе в процессе проведения расчета. В основе динамической балансировки лежит реализованный ранее аппарат засечек времени выполнения, который на каждом процессоре подсчитывает время полезного счета и время накладных расходов на обеспечение многопроцессорности (время, затраченное на межпроцессорные обмены, сбор и разбор буферов обменов, ожидание в точках синхронизации и т. д.). Работа динамической балансировки производится в два этапа. Первый – анализ текущего состояния расчета и определение необходимости перераспределения счетных точек между процессорами. Второй – по необходимости – реальное перераспределение счетных точек между процессорами. В качестве примера работы динамической балансировки можно привести расчет, в котором эффективность распараллеливания после первоначальной статической балансировки была

28 %, а после нескольких шагов динамической балансировки достигла 72 % (чаще всего эффективность повышается на 10–20 единиц). При этом затраты на динамическую балансировку составляют доли процента от времени полезного счета.

В рамках программного комплекса ЛЭГАК-3D было проведено численное моделирование предстоящих экспериментов по компактированию цилиндрических каналов в уране. Расчетному анализу подвергалось исследование влияния введения газодинамического слоя между ударником и мишенью, боковых трехмерных разгрузок, различного расположения каналов относительно друг друга. В рамках настоящей работы получены предварительные результаты планируемых опытов. Подобное численное моделирование предстоящих экспериментов в трехмерной постановке выполнено впервые.

Применение этого комплекса позволило промоделировать опыты по исследованию предельной деформации разрушения разлетающихся урановых



Численное моделирование экспериментов по компактированию цилиндрических каналов в уране. Распределение давления в образцах на момент времени 1,5 мкс: а – во всех исследуемых в эксперименте образцах; б – в образцах с одиночными каналами

оболочек. Результаты расчетов показали, что учет разрушения урана по модели хрупкого откола на уровне  $P_{отк} = -1$  ГПа позволяет корректно описать опытные данные. Показано, что использование секторного выреза не оказывает влияния на регистрируемую в опыте рентгеновскую картину распределения трещин. Кроме того, показано, что регистрируемая в эксперименте рентгеновская картина распределения трещин на стенке оболочки не подвержена влиянию трехмерных разгрузок от секторного выреза.

Значительное внимание в программе исследований по инерциальному синтезу было уделено разработке численных методик, позволяющих описывать трехмерный перенос лазерного и рентгеновского излучений внутри боксов-конверторов лазерных мишеней. Созданная в ИТМФ в сотрудничестве с ИЛФИ численная методика СНД-ЛИРА дает возможность на основе секторного приближения в трехмер-

ной постановке сквозным образом рассчитывать распространение и поглощение лазерного излучения, а также генерацию и перенос спектрального рентгеновского излучения во внутреннем объеме бокса-конвертора. По программе СНД-ЛИРА проведено численное моделирование динамики полей излучения (лазерного и рентгеновского) в экспериментах со сферическими боксами при использовании покрытий из различных материалов, нанесенных на их внутреннюю поверхность: слоя золота толщиной  $\sim 1$  мкм и слоя магния толщиной  $\sim 4$  мкм. Во всех расчетах энергия лазерного излучения составляла  $E_n = 2,45$  кДж при длительности импульса, измеренной на его полувысоте,  $\tau_{0,5} = 0,6$  нс. При указанных толщинах слоев этих веществ в процессе лазерного нагрева не прогорают и на спектр рентгеновского излучения внутри бокса материал основания, на которое наносится покрытие, не влияет.

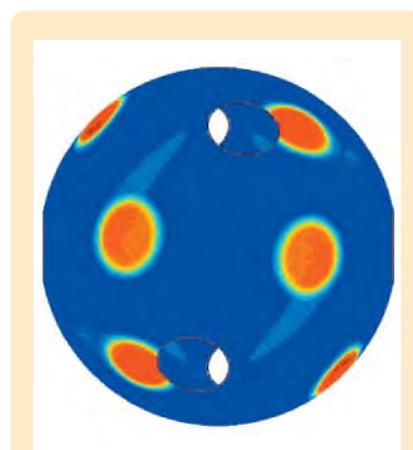
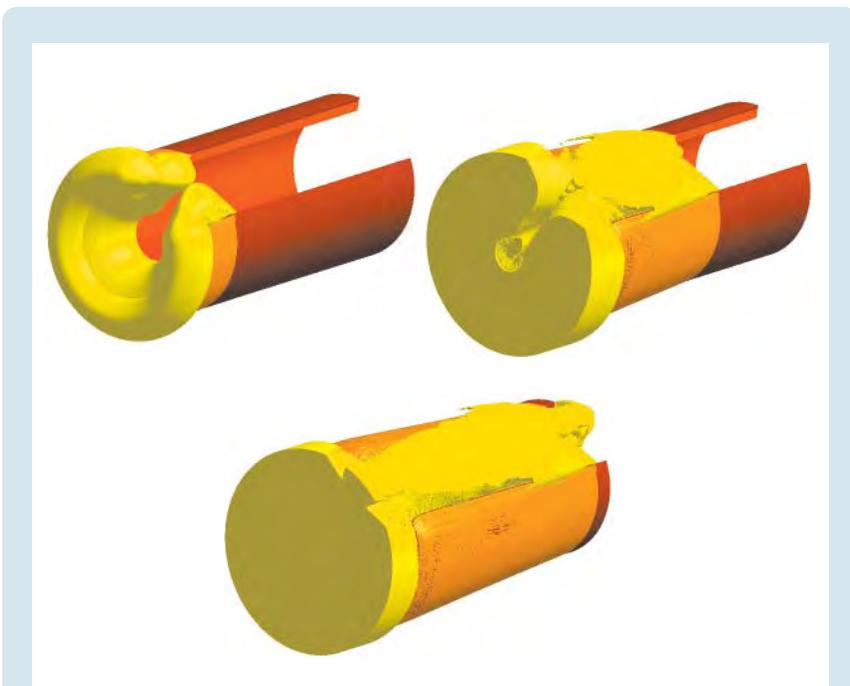


Схема лазерной освещенности внутренней поверхности сферического бокса в экспериментах на второй гармонике иодного лазера  $\lambda = 0,657$  мкм (резко выделяются зоны пятен первичной лазерной засветки)

По численной методике СНД-ЛИРА проведена серия расчетов для двух значений коэффициента  $f$  в ограничении потока электронной теплопроводности ( $q = fkT_e v_e$ , где  $T_e$  – температура электронов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $v_e$  – тепловая скорость электронов):  $f = 0,1$  и  $f = 0,03$ . В численных расчетах определялись условия поглощения лазерного излучения на стенках бокса, находились спектры неравновесного рентгеновского излучения, генерируемого в сферическом боксе, а также рассчитывались спектральные неоднородности рентгеновской освещенности капсулы с термоядерным топливом. С уменьшением атомного номера  $Z$  вещества покрытия стенок бокса снижается коэффициент поглощения лазерной энергии и происходит падение эффективной температуры рентгеновского излучения. Численные исследования показали сильную зависимость результатов от коэффициента  $f$ . Так, для стандартного бокса с золотым покрытием при снижении  $f$  с 0,1 до 0,03 коэффици-



Численное моделирование экспериментов по исследованию предельной деформации разрушения разлетающихся урановых оболочек. Разлет уранового цилиндра

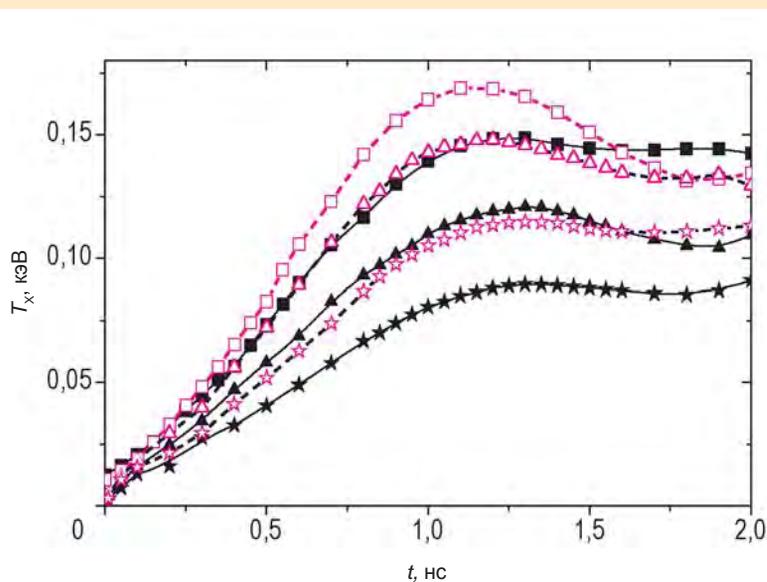


ент поглощения в пятнах первичной лазерной засветки снижается с 0,83 до 0,50, а максимальная температура рентгеновского излучения в боксе падает с 170 до 150 эВ. Среднеквадратичная неоднородность рентгеновской освещенности капсулы с термоядерным топливом в этих расчетах составляла 1–3 %. В экспериментах с мишенями непрямого облучения, выполненных на лазерной установке «Искра-5» на второй гармонике иодного лазера ( $\lambda = 0,65$  мкм), найдена зависимость (скейлинг) эффективной температуры  $T$  рентгеновского излучения в боксе от интенсивности лазерного излучения. Полученная в расчете эффективная температура излучения для пустого сферического бокса (без капсулы) с золотым покрытием внутренней поверхности составляет 143 эВ при  $f = 0,03$  и 159 эВ при  $f = 0,1$ , а экспериментальный скейлинг с учетом потери 493 Дж лазерной энергии в отверстиях дает 139 эВ. Сравнение расчетных данных с эффективной температурой в боксе

по экспериментальному скейлингу показывает, что результаты измерений воспроизводятся при численном моделировании с коэффициентом ограничения  $f = 0,03$ . В лазерных мишенях непрямого облучения сжатие и нагрев вещества капсулы до условий, когда протекают интенсивные реакции термоядерного горения, происходят под воздействием квазиравновесного рентгеновского излучения, генерирующегося на стенках бокса-конвертора вследствие поглощения излучения лазерного драйвера. Актуальность проведенной работы состоит в том, что путем сравнения экспериментальных и расчетных данных удается определить коэффициент  $f$  в ограничении потока электронной теплопроводности, что очень важно для корректного описания процессов переноса тепла электронами в объеме образующейся пристеночной плазмы при моделировании условий взаимодействия интенсивного лазерного излучения наносекундной длительности.

Активно развивалась методика численного моделирования электромагнитного излучения (ЭМИ). Проведен анализ уравнений гидродинамической модели ионосферы с целью получения оценки нагрева электронов на начальной стадии взаимодействия электромагнитного импульса приземного ядерного взрыва (ЯВ) с ионосферной плазмой (на временах 1–5 мкс). Сделана постановка представительной одномерной модельной задачи о распространении ЭМИ ЯВ в ионосферной плазме. Проведено аналитическое рассмотрение влияния пространственной дисперсии на режим распространения импульса в ионосфере в предположении, что импульс слабо меняет параметры плазмы ионосферы. Разработаны разностные схемы для решения уравнений одномерной модели распространения ЭМИ ЯВ в ионосферной плазме с согласованием численных схем решения уравнений Максвелла и уравнений гидродинамической модели плазмы. Выполнена серия расчетов по этой модели. Разработаны рекомендации по выбору счетных параметров для двух практически важных ситуаций: преобладающего влияния электронной дисперсии на распространение ЭМИ ЯВ и преобладающего влияния проводимости плазмы на взаимодействие ЭМИ мощного ЯВ с ионосферой.

На задаче о численном моделировании взаимодействия короткоимпульсного лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой проведено изучение возможностей математической модели, содержащей в расчетной области граничные поглощающие слои. При этом использована так называемая модель идеально-согласованного слоя. Показано, что изменение границ расчетной области при наличии вблизи них поглощающих слоев не приводит к значитель-



Зависимость эффективной температуры рентгеновского излучения от времени при  $f = 0,1$  (светлые маркеры) и  $f = 0,03$  (темные маркеры) для сферического бокса с покрытием из золота, меди или магнезия, внутри которого расположена капсула с термоядерным топливом:

■, □ – Au; ▲, △ – Cu; ★, ☆ – Mg

ному изменению интегральных характеристик взаимодействия, таких как полные кинетические энергии компонент плазмы и коэффициент поглощения лазерной энергии, если при их подсчете учесть вклад частиц, вышедших за границы области. В то же время существенное приближение границ расчетной области к начальным границам области, занимаемой плазмой, может качественно повлиять на спектры высокоэнергетических частиц (с энергиями в несколько десятков мегаэлектронвольт).

Большая работа проведена по усовершенствованию моделей уравнений состояния (УРС) веществ и пробегов излучения в веществах с целью расширения их области применимости и повышения точности описания физики происходящих процессов. С использованием созданной ранее модели широкодиапазонного полуэмпирического УРС металлов, в которой эффективно учитывается влияние процессов ионизации на термодинамические функции, разработаны УРС вольфрама, тантала, бериллия и алюминия. Эти УРС описывают как состояния в экспериментально исследованной области, так и состояния в области сверхвысоких давлений и температур, рассчитываемые по теоретическим статистическим моделям типа Томаса – Ферми. Для своей области применимости УРС содержат относительно небольшое число свободных параметров, большинство из которых имеет физический смысл.

Создана новая версия программы THERMOS для расчета спектральных коэффициентов поглощения фотонов на основе модифицированного приближения Дирака – Хартри – Фока – Слэтера с последовательным учетом одноэлектронных релятивистских эффектов (реализована эффективная методи-

ка – без перебора конфигураций). Проведено сравнение ряда характеристик (волновые функции, силы осцилляторов и др.) с аналитическими выражениями, а также сравнение спектров с результатами расчетов по современной версии (6.4gamma) программы THERMOS.

Проведена работа по распараллеливанию вычислений пробегов фотонов в веществе в программе ПЕРСТ для использования ее на ЭВМ с арифметическими ускорителями. В программе ПЕРСТ рассчитываются сечения тормозного поглощения, фотопоглощения, поглощения в линиях и рассеяния. Расчет фотосечений представляет наибольшие вычислительные трудности по затратам как календарного времени, так и времени центрального процессора. Расчет сечений для всех ионов и при каждом значении частоты выполняется независимым образом. Поэтому на многопроцессорных ЭВМ удалось распараллелить перебор конфигураций ионов, а при наличии графических арифметических ускорителей дополнительно распараллелить расчеты на частотной сетке. Такие режимы распараллеливания реализованы на ускорителях с использованием технологий CUDA и OpenCL. Длительность выполнения программы при использовании арифметических ускорителей сократилась в 10–15 раз.

Создана база экспериментальных данных интерактивной справочной системы (база ЭДИСС) пакета УРС-ОФ, предназначенная для упорядоченного хранения, просмотра, редактирования и копирования экспериментальных данных, используемых при разработке и тестировании УРС. Интерактивная оболочка для работы с базой реализована как web-сайт. Благодаря этому база ЭДИСС предоставляет пользователям следующие возможности:

- работа с любого компьютера локальной вычислительной сети без использования какого-либо специального приложения;
- одновременный доступ к базе любого количества пользователей сети;
- автоматическое получение обновлений базы ЭДИСС;
- удаленное администрирование и защита базы данных.

База ЭДИСС имеет разрешительную систему с определением уровней доступа пользователей и автоматическим выполнением авторизации. База имеет удобный интерактивный интерфейс для поиска, предоставления и экспорта информации, содержит средства для внесения новых данных, корректировки и удаления уже существующих.

В соответствии с проектом развития суперкомпьютеров РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается отечественную программную платформу для высокопроизводительных вычислений, основанную на развитии созданного в РФЯЦ-ВНИИЭФ и свободно распространяемого системного программного обеспечения (ПО). Целью является разработка полнофункционального современного системного ПО для эффективного использования ресурсов широкого спектра высокопроизводительных вычислительных систем: компактные суперЭВМ, универсальные и гибридные; мощные суперЭВМ и неоднородные многомашинные комплексы. По данному направлению ведется разработка уникальных базовых компонентов системного ПО и новых программных технологий.

Основные результаты 2010 года:

- Разработано ПО управления иерархическим хранением данных для высокопроизводительных параллельных вычислительных систем, обеспечивающее высокоскоростной доступ к данным и надежность хранения. ПО системы хранения



и доступа состоит из следующих основных компонентов:

- параллельная файловая система;
- система автоматической миграции данных между уровнями хранения;
- архив данных производственных задач;
- подсистема резервного копирования.

– Реализована единая очередь заданий на перемещение данных между уровнями хранения, позволяющая централизованно управлять распределенными операциями и оптимизировать использование оборудования. В рамках созданного графического интерфейса предоставляются средства для администрирования, мониторинга, анализа статистической информации и навигации по различным уровням хранения. Масштабируемость ПО системы хранения и доступа обеспечивается масштабируемостью отдельных компонентов, входящих в ее состав.

– Реализована параллельная операционная среда для высокопроизводительных параллельных вычислительных систем нового поколения. В состав разработанных компонентов программного обеспечения параллельной операционной среды входят:

- бездисковая операционная система (ОС), оптимизированная для высокопроизводительных вычислений;
- коммуникационное системное ПО;
- система управления заданиями и ресурсами;
- система мониторинга аппаратных и программных компонентов.

– Реализованы система сетевой загрузки и технология создания ОЗУ-резидентной ОС. Система сетевой загрузки ОС позволяет отказаться от использования дисков на узлах вычислительного поля и загружать ОС по сети Ethernet или высокоскоростной коммуникационной

сети InfiniBand. Создана специализированная компактная ОЗУ-резидентная ОС для вычислительных узлов на основе полноценного дистрибутива, базирующегося на ядре Linux, оптимизированная для высокопроизводительных вычислений. Основным компонентом системы управления заданиями и ресурсами является локальная система пакетного запуска параллельных приложений (JAM). В JAM реализованы наиболее полезные функции ее аналогов (PBS, LoadLeveler, SLURM, Condor и т. д.), и она ориентирована на полноценный учет специфики ЭВМ и счета на них задач. JAM поддерживает последовательные, параллельные и OpenMP задания. В системе реализован эффективный алгоритм планирования – метод фонового заполнения Backfill.

В системе мониторинга аппаратно-программных компонентов основное внимание уделено алгоритмам функционирования и программным решениям реализации, благодаря которым достигаются масштабируемость и функциональная распределенность системы, обеспечивающие мониторинг такого числа оборудования и метрик, которое соответствует современным суперЭВМ.

Получены следующие свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

- тестовая подсистема библиотеки решателей LParSol;
- Visual Sparse Tools для исследования свойств систем линейных алгебраических уравнений и для обучения работы с библиотекой LParSol;
- тестовая подсистема библиотеки решателей LParSol;
- отладчик параллельных приложений (PDB);
- система пакетной обработки заданий Java Maui (СПО JAM);
- система для диагностики состояния системных компонентов мультипроцессорных вычислительных систем (MonDiag2009).

Важное место в деятельности специалистов ИТМФ в последние годы занимает разработка методов и ПО для имитационного моделирования на многопроцессорных ЭВМ практических задач наукоемких отраслей промышленности, таких как атомная энергетика, авиастроение, автомобилестроение и других. Эти работы ведутся в рамках проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», принятого к реализации Комиссией при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики РФ. Головным исполнителем указанного проекта утвержден ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В 2010 году работы по проекту были развернуты по трем основным направлениям:

1. Создание отечественного конкурентоспособного ПО для комплексного имитационного 3D моделирования на суперЭВМ с массовым параллелизмом в интересах проектирования и создания наукоемкой продукции ведущих отраслей отечественной промышленности.

2. Внедрение созданного ПО в высокотехнологичные отрасли промышленности в целях проектирования и разработки конкурентоспособных образцов современной техники.

3. Разработка базового ряда суперЭВМ, включающего в себя:

- высокопроизводительный вычислительный комплекс нового поколения для решения стратегических задач наукоемких отраслей;
- компактные суперЭВМ терафлопсного класса для массового применения на предприятиях промышленности, в науке и образовании.

Учитывая важность и большой объем решаемых задач, работа по реализации проекта в 2010 году велась в широкой кооперации с организациями Госкорпорации «Росатом», Минобрнауки, РАН, промышленными предприятиями. Совместная ра-

бота ведется в рамках 38 контрактных договоров с соисполнителями проекта. В 2010 году число предприятий и организаций, имеющих удаленный доступ к вычислительным ресурсам суперкомпьютерного центра ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», увеличилось с шести до двенадцати.

По первому направлению работ важным результатом 2010 года стала сдача в эксплуатацию первых версий отечественных пакетов программ ЛОГОС, ЛЭГАК-ДК, ДАНКО + ГЕПАРД, НИМФА, предназначенных для имитационного 3D моделирования на суперЭВМ с массовым параллелизмом. Результатом мирового уровня является то, что созданные первые версии отечественных пакетов программ позволяют проводить расчеты с использованием до 1000 процессоров. Это в несколько сотен раз ускоряет время проведения отдельного расчета и расширяет возможности многовариантных расчетов.

В рамках работ по второму направлению в 2010 году версиями отечественных базовых пакетов программ имитационного 3D моделирования на суперЭВМ с массовым параллелизмом разработки ИТМФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» было оснащено около 140 рабочих мест на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности. Среди них ОАО «КАМАЗ», ОКБ «Сухой», НПО «Сатурн». На базе ИТМФ проведено семь семинаров по обучению специалистов предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности работе с первыми версиями отечественных базовых пакетов программ имитационного 3D моделирования. В 2010 году обучение на этих семинарах прошли 140 специалистов из 12 организаций ГК «Росатом», ФКА «Роскосмос», авиационной и автомобильной промышленности. Подготовка специалистов промышленных предприятий и оснащение рабочих мест отечественными пакетами программ имитаци-

онного 3D моделирования позволили приступить к совместным работам по верификации и валидации ПО и его практическому применению при расчетной обработке отдельных элементов конструкций сложных образцов техники. В ходе проведения этих работ достигнут ряд важных результатов. В том числе:

а) в ОКБ «Сухой» моделируется топливная система истребителя Су-35, ведутся работы по решению проблемы безопасности нового регионального пассажирского самолета Superjet-100 в условиях аварийной посадки с невыпущенными или частично выпущенными шасси;

б) в НПО «Сатурн» исследован обрыв лопатки вентилятора газотурбинного двигателя Д30\_КП-Бурлак в целях безопасности его эксплуатации в полетных условиях;

в) в ОКБМ «Африкантов» проведено обоснование гидродинамических и прочностных характеристик ряда элементов оборудования корабельных ЯЭУ;

г) для «КАМАЗа» обоснована взрывостойкость бронеавтомобиля КАМАЗ-43269; рассчитаны аэродинамические характеристики тягача с прицепом на примере модели КАМАЗ-5308; проведен прочностный анализ рамы КАМАЗ-5308.

В 2010 году в ИТМФ успешно проводилась работа по развитию базового ряда суперЭВМ. Так, в рамках создания высокопроизводительного вычислительного комплекса нового поколения, способного решать стратегические задачи предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности:

– разработаны технические предложения на вычислительный комплекс нового поколения, которые утверждены государственной комиссией и одобрены межотраслевой экспертизой с участием РАН;

– разработан и утвержден технический проект на высокопро-

изводительный вычислительный комплекс нового поколения;

– созданы инженерные системы жизнеобеспечения;

– ведутся работы по созданию системного ПО и его тестированию.

Основным результатом по данному направлению является ввод в эксплуатацию в декабре 2010 года фрагмента высокопроизводительного вычислительного комплекса суперЭВМ МП-1Р. В первом квартале 2011 года, с опережением на девять месяцев, высокопроизводительный вычислительный комплекс нового поколения будет введен в эксплуатацию в полном объеме. Фрагмент этого комплекса в объеме 300 Тфлопс будет предоставлен для удаленных расчетов сторонним предприятиям и организациям. Параллельно с созданием высокопроизводительного вычислительного комплекса нового поколения в ИТМФ продолжалась работа по совершенствованию двух типов компактных суперЭВМ. Разработанная в ИТМФ универсальная компактная суперЭВМ терафлопсного класса в составе аппаратно-программного комплекса АПК-1 в 2010 году была представлена Государственной комиссии. По итогам работы Государственная комиссия рекомендовала комплекс АПК-1 к серийному производству и отметила, что АПК-1 является уникальной разработкой и по совокупности параметров является лидером в России среди своих аналогов. Компактный многопроцессорный высокопроизводительный вычислительный комплекс АПК-1 пиковой производительностью 1,1 Тфлопс предназначен для индивидуального и коллективного использования конструкторами, исследователями, математиками в рабочих комнатах и лабораториях, так как не требует отдельных помещений, оснащенных специальными инженерными системами жизнеобеспечения.



АПК-1 обеспечивает проведение расчетов, требующих больших вычислительных ресурсов, оснащен базовым системным ПО и прикладным ПО разработки ИТМФ РЯЦ-ВНИИЭФ, ориентированным на решение конкретных задач трехмерного имитационного моделирования с целью повышения точности и уменьшения сроков инженерных расчетов при проектировании и создании новых образцов техники на предприятиях высокотехнологичных областей. В 2010 году АПК-1 был с успехом представлен на 9 международных выставках и форумах (Атомэкс и XIV Международный петербургский экономический форум (Санкт-Петербург); Высокие технологии-2010, Связь-Экспоком-2010, Атомэкспо-2010, Нефтегаз-2010 (Москва); Ярмарка атомного машиностроения и Россия единая-2010 (Нижний Новгород), Иннопром-2010 (Екатеринбург)). В соответствии с государственным контрактом в 2010 году в ИТМФ было изготов-

лено 15 экземпляров АПК-1, которые переданы в 11 организаций-соисполнителей проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий». Шесть экземпляров АПК-1 реализованы на коммерческой основе.

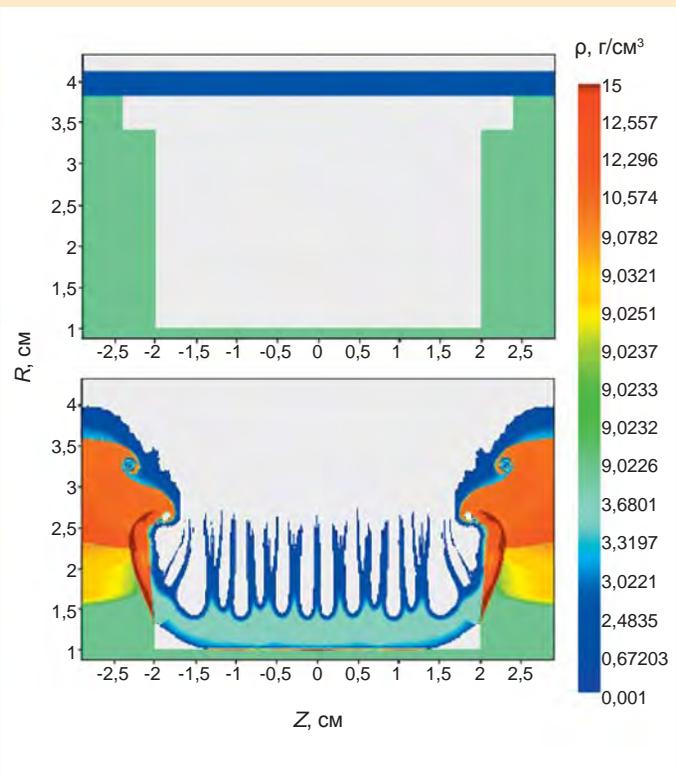
Наряду с универсальными компактными суперЭВМ в ИТМФ были разработаны экспериментальные образцы программно-аппаратных комплексов на базе специализированных компактных суперЭВМ. Эта работа выполнялась в рамках реализации государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям. Применение программно-аппаратных комплексов позволяет более чем на порядок сократить длительность решения задач математического моделирования объектов атомной энергетики, в частности расчет критических параметров активных зон реакторов, с использованием трехмерного потвального описания их геометрии, а также описания

свойств материалов, находящихся в условиях мощного радиационного воздействия.

В 2010 году в ИТМФ активно велись расчетно-теоретические работы, связанные с подготовкой и обоснованием экспериментальных исследований, проводимых во ВНИИЭФ. Выполнены «симметричные» расчеты лайнерного пондеромоторного узла (ПУ) для экспериментов с дисковым ВМГ по ускорению током  $\sim 60$  МА лайнера-ударника массой  $\sim 20$  г/см до скорости 20 км/с. Цель экспериментов – измерение ударных адиабат материалов при давлениях  $\sim 10$  Мбар. Расчеты проводились по методикам ТИМ-2Д и МИД. Удалось подобрать форму торцевых Си-элементов ПУ, которая обеспечивает удовлетворительную форму внутренней поверхности Al-лайнера перед соударением с мишенью диаметром 2 см (на наружной поверхности лайнера были заданы случайные начальные возмущения).



Универсальная компактная суперЭВМ терафlopного класса в составе аппаратно-программного комплекса АПК-1

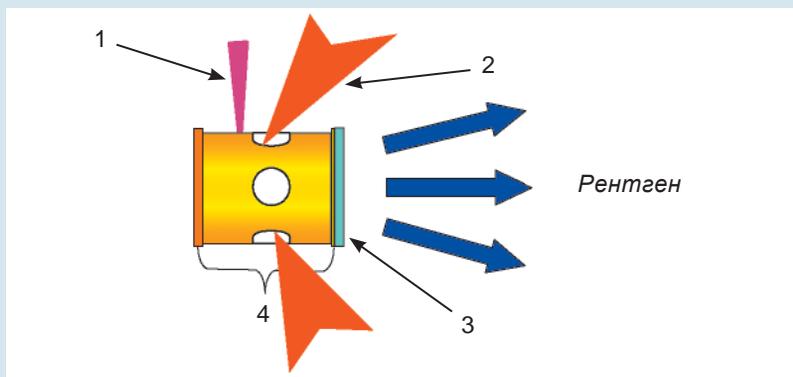


Изолнии плотности лайнерного ПУ до начала и в конце импзии (расчет по методике МИД)

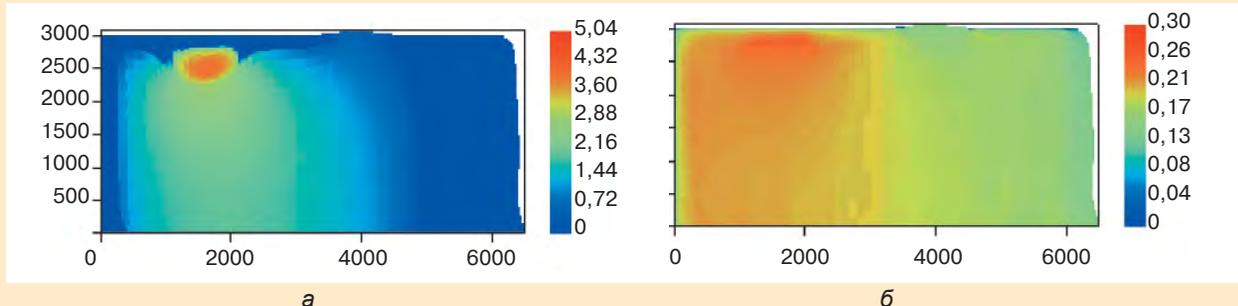
В РФЯЦ-ВНИИЭФ планируется строительство перспективной лазерной установки УФЛ с энергией в импульсе до 2 МДж. С целью подготовки программы предстоящих экспериментов и выполнения сравнительного анализа параметров излучения в различных вариантах установки проводились расчетные оценки параметров рентгеновского излучения, генерируемого в цилиндрической мишени

типа «Иллюминатор». Двумерные расчеты по программам ФОМИМ и МИММК показали, что при введении внутрь мишени лазерной энергии 300 кДж в импульсе длительностью 3 нс можно на второй гармонике (длина волны 0,52 мкм) в боксе диаметром 6 мм и длиной 6 мм достичь эффективной температуры излучения 230 эВ и на третьей гармонике (длина волны 0,35 мкм) в боксе диаметром 4 мм и длиной 4 мм – 300 эВ.

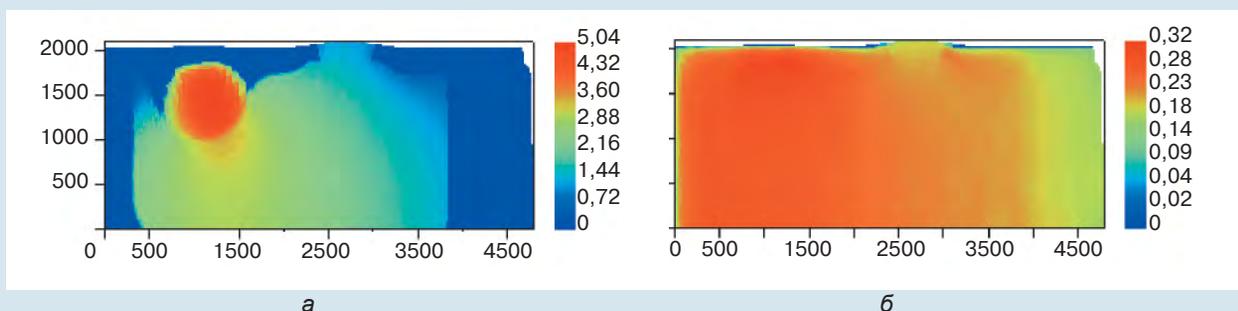
На лазерной установке «Искра-5» проводятся эксперименты по генерации ударных волн в различных материалах при непрямом (рентгеновском) облучении в мишенях типа «Иллюминатор». Выполнено расчетное моделирование опытов с расположением исследуемого материала (алюминий двух толщин) на торце мишени. Результаты двумерных расчетов по программе ФОМИМ с пробегам излучения, рассчитанными по программам ПЕРСТ и THERMOS, оказались достаточно близкими. Для лазерного импульса второй гармонике (длина волны  $\lambda = 0,66$  мкм) длительностью  $\tau_{0,5} = 0,5$  нс и энергией 900 Дж получена максимальная температура излучения на внутренней поверхности слоя алюминия толщиной 20 мкм ~32 км/с, в ступеньке толщиной 10 мкм ~49 км/с. Максимальное давление за фронтом ударной волны в алюминии составляет ~50 Мбар. В аналогичных опытах со свинцовым слоем достигнута давления ~90 Мбар.



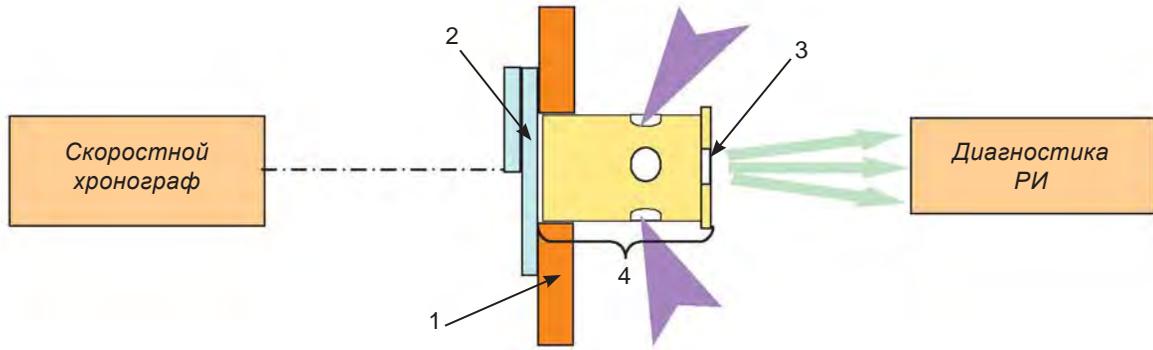
Мишень «Иллюминатор»: 1 – держатель; 2 – лазерные пучки; 3 – выходное окно; 4 – корпус



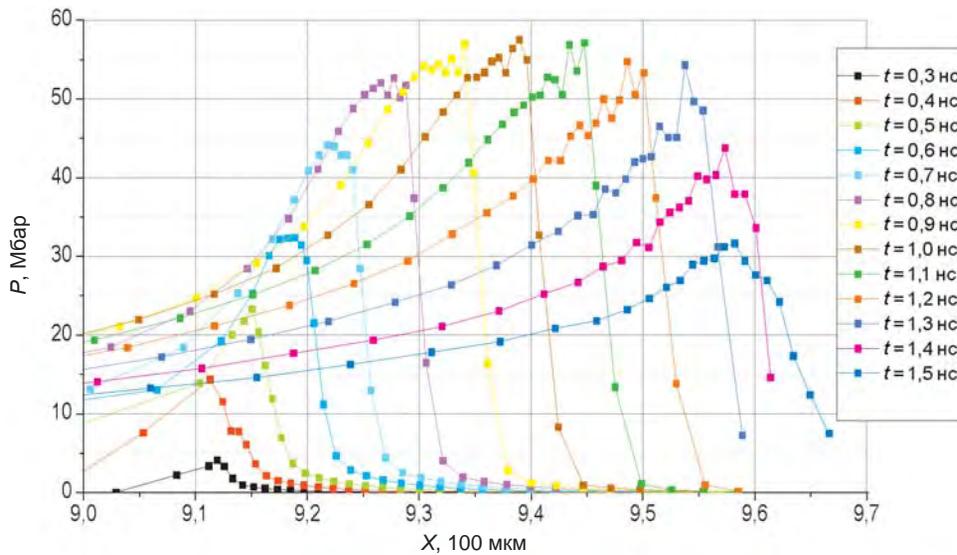
Пространственное распределение температуры электронов (а) и излучения (б) на момент середины лазерного импульса в расчете для второй гармонике



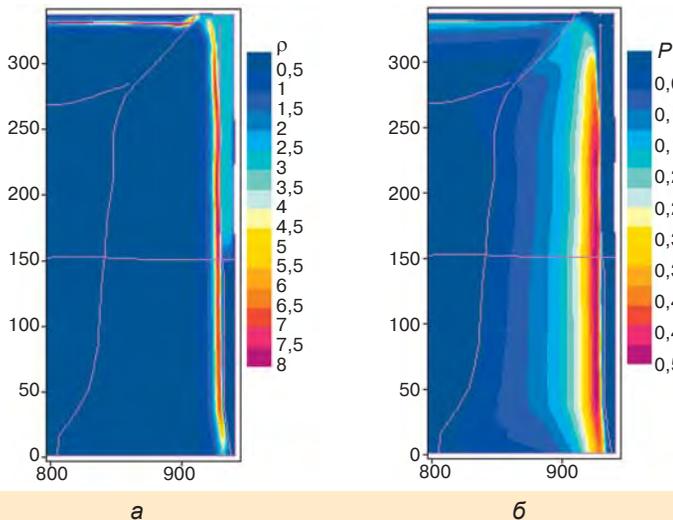
Пространственное распределение температуры электронов (а) и излучения (б) на момент середины лазерного импульса в расчете для третьей гармонике



Принципиальная схема экспериментов по генерации ударных волн: 1 – антибликовый экран; 2 – образец исследуемого материала; 3 – выходное окно для регистрации потока РИ; 4 – иллюминатор



Профили давления в алюминиевом слое из расчета МММК



Пространственное распределение плотности (а) и давления (б) на момент выхода ударной волны из базового слоя алюминия толщиной 20 мкм

В 2010 году проведено исследование физических механизмов инициирования детонации и завершено создание модели ударно-волновой чувствительности твердых гетерогенных ВВ. Концепция горячих точек (ГТ) и очаговый механизм инициирования детонации – базовые представления современной физики взрыва. Взаимодействие ударной волны с дефектами структуры твердых гетерогенных ВВ приводит к неоднородности деформации сжатого объема ВВ, локализации и диссипации энергии в отдельных очагах ГТ, в которых начинается процесс разложения

ВВ. Их дальнейшее развитие приводит к макроскопическому взрыву. Время индукции детонации определяется характерным временем второго этапа – роста ГТ до их соприкосновения. При характерных размерах гранул ВВ ~100 мкм и характерном времени индукции детонации ~1 мкс скорость роста ГТ должна быть не менее 50–100 м/с. Это на три порядка выше скорости обычного послыоного горения ВВ. Определяющим механизмом переноса энергии является вихревой характер течения – турбулентность, которая возникает из-за многомерности процесса горения и роста ГТ и вследствие газодинамической сдвиговой неустойчивости на фронте горения. Благодаря большой интенсивности турбулентного перемешивания такие течения обладают повышенной способностью к передаче теплоты, ускоренному распространению химических реакций, в частности горения. Полученная путем численного моделирования

скорость роста ГТ более 100 м/с подтверждает гипотезу о турбулентном механизме переноса энергии в процессе роста ГТ при инициировании детонации. Физическая картина выглядит так: под действием ударной волны и в результате вихревого течения крупномасштабные частицы дробятся до мелких размеров и перемешиваются. Основной процесс энергопереноса в пространстве происходит турбулентно, при этом за счет развитой поверхности контакта ВВ и продуктов взрыва ВВ успевают прогреваться посредством молекулярной теплопроводности (передача энергии от продуктов взрыва) и продолжается интенсивная реакция разложения (горение с теплопроводностью с поверхности мелких частиц). Условно картину инициирования гетерогенных ВВ можно представить поэтапно:

1) Формирование ГТ – стадия от момента сжатия ВВ ударной волной до начала химической реакции в локальных очагах.

2) Рост горячего очага (ГТ) – развитие реакции разложения в окружающем ВВ.

3) Взаимодействие и быстрое слияние очагов – быстрое завершение реакции при высокой температуре и давлении в момент, когда реагирующие области начинают сливаться, что и обеспечивает быстрый переход к самоподдерживающемуся стационарному детонационному процессу (собственно взрыв).

На основе этих представлений создана модель кинетики детонации твердых ВВ – модель МК, которая введена в основные математические методики ИТМФ. Модель прошла тестирование на широком наборе экспериментов с различным инициирующим воздействием на ВВ в одномерных, двумерных и трехмерных расчетах. Получены наборы параметров модели для восьми составов на основе ТАТБ, октогена, гексогена, ТЭНа. Модель используется в производственных расчетах.

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Впервые получены экспериментальные данные о сжимаемости дейтерия при давлениях до 2000 ГПа. Настоящие исследования явились логическим продолжением измерений сжимаемости водорода, выполненных во ВНИИЭФ в 1970-е годы группой С. Б. Кормера, в диапазоне давлений до 1300 ГПа. Взрывное обжатие дейтерия осуществлялось системой сферически сходящихся ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и под действием стальной оболочки, сходящейся к центру. Теневое изображение границ оболочки, сжимающей газообразный дейтерий, получено с одновременным использованием тормозного излучения трех мощных бе-

татронов, что позволило за один эксперимент зарегистрировать девять фаз движения оболочки и проследить за динамикой процесса сжатия. При начальном давлении дейтерия  $P_0 = 267$  атм и температуре  $T_0 = 10,5$  °С (плотность газообразного дейтерия  $\rho_0 = 0,04$  г/см<sup>3</sup>) измерена средняя плотность сжатого газа  $\rho = \delta \rho_0 = 4,3 \pm 0,7$  г/см<sup>3</sup>. Здесь  $\delta = (R_0/R_{\min})^3$ , где  $R_0$  – радиус внутренней границы сферической оболочки в исходном состоянии;  $\rho_0$  – начальная плотность газа,  $R_{\min}$  – радиус полости в момент «остановки» оболочки. Давление в дейтериевой плазме определяется из газодинамических расчетов с учетом реальных термодинамических и прочностных

свойств элементов экспериментального устройства.

Для исследования возможности получения экспериментальных данных о квазиизэнтропической сжимаемости изотопов водорода и гелия при давлениях до 3000 ГПа проведены эксперименты с использованием специально разработанных сферических двухкаскадных взрывных устройств с газовой симметризацией. Основной трудностью в проведении подобных экспериментов является обеспечение симметрии сжатия полости с газом. Отклонения от сферической симметрии приводят к росту погрешности определения средних плотностей сжатых газов. Анализ результатов экспе-

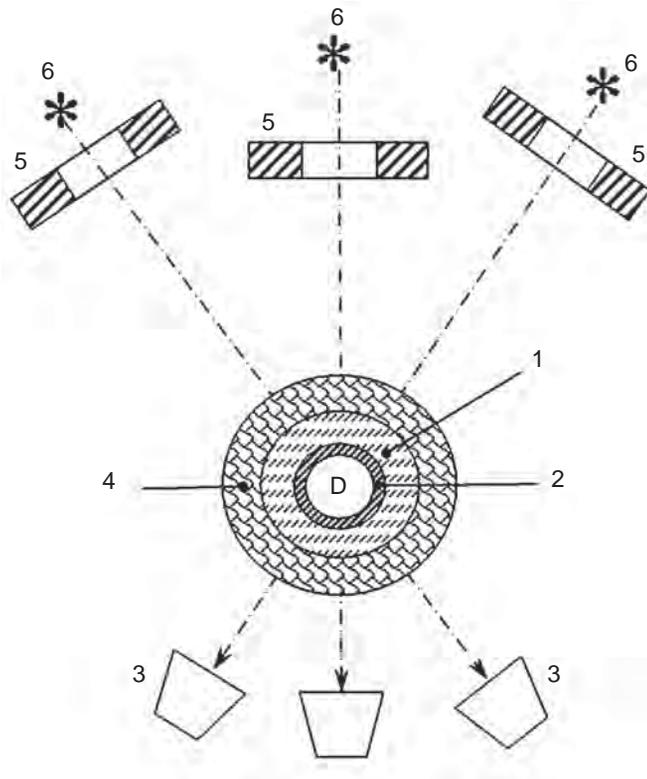
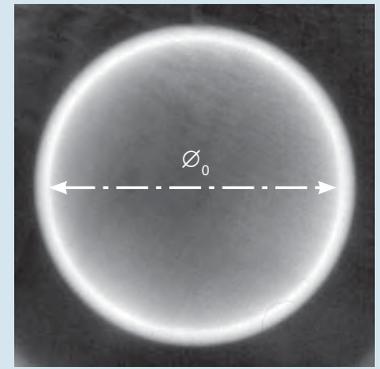
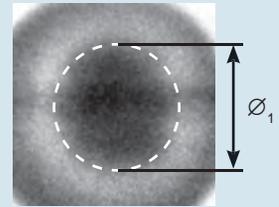


Схема эксперимента по сжимаемости дейтерия:  
1 – прокладка (полиэтилен); 2 – сферическая камера;  
3 – электронно-оптические регистраторы; 4 – заряд ВВ;  
5 – защитное устройство; 6 – источники излучения

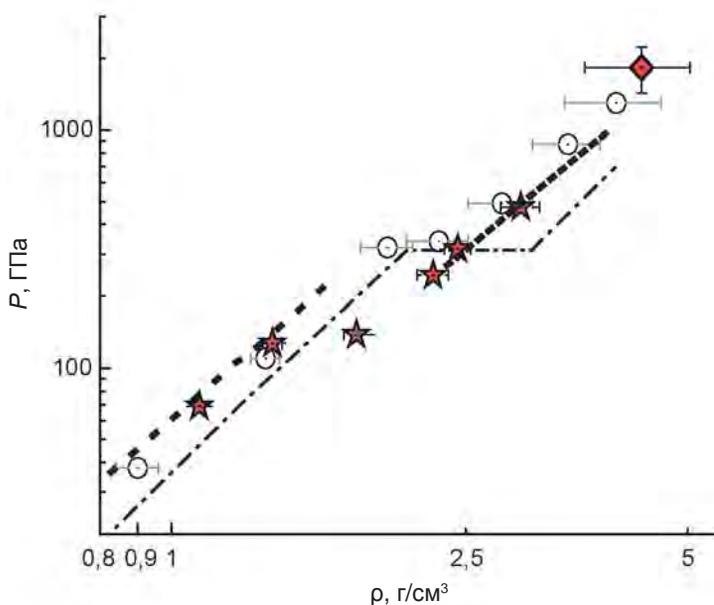


а



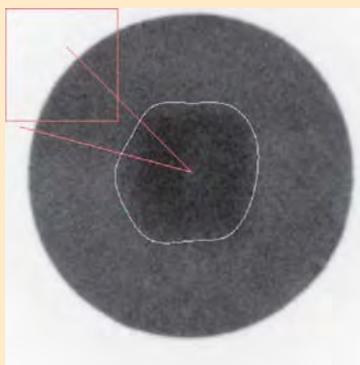
б

Рентгеновское изображение сферической оболочки с газообразным дейтерием:  
а – в исходном состоянии ( $\varnothing_0$  – масштаб 1:2);  
б – в момент максимального сжатия ( $\varnothing_1$  – масштаб 1:1)

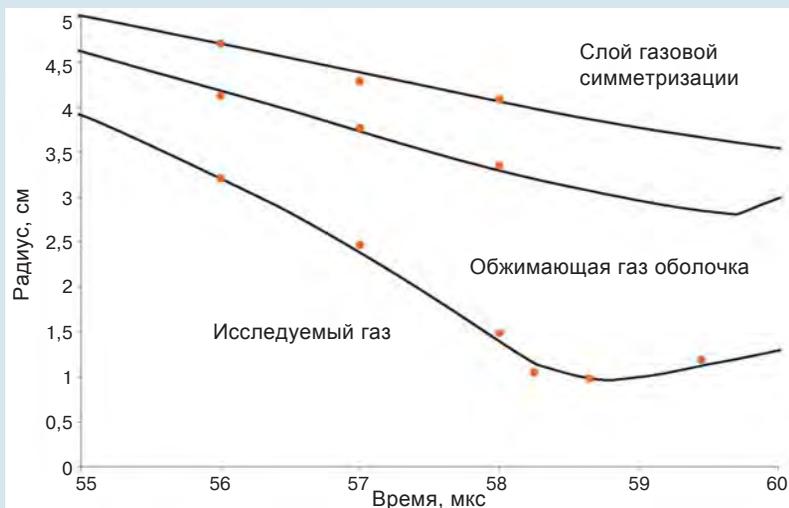


Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 1800 ГПа: ---, - · - · - расчет; ○, ★, ◆ – эксперимент

риментов показал, что экспериментальные данные удовлетворительно описываются численным расчетом при использовании существующих уравнений состояния (УРС) дейтерия. Эксперименты подтвердили возможность получения надежной информации о сжимаемости дейтерия и гелия до плотностей  $\sim 5$  г/см<sup>3</sup> и давлений 2000–3000 ГПа. Использование газовой симметризации в разработанных экспериментальных блоках позволило обеспечить приемлемый уровень симметрии сжатого газа. Результаты проведенных и планируемых экспериментов будут использоваться для проверки УРС изотопов водорода и гелия, а также для тестирования двумерных и трехмерных методик численных расчетов различных взрывных устройств, в том числе в целях осуществления инерциального термоядерного синтеза.



Рентгено снимок газовой полости на момент времени, близкий к максимальному сжатию газа. Выделенный контур поверхности полости получен методом функциональной трассировки с помощью численной обработки оцифрованного изображения

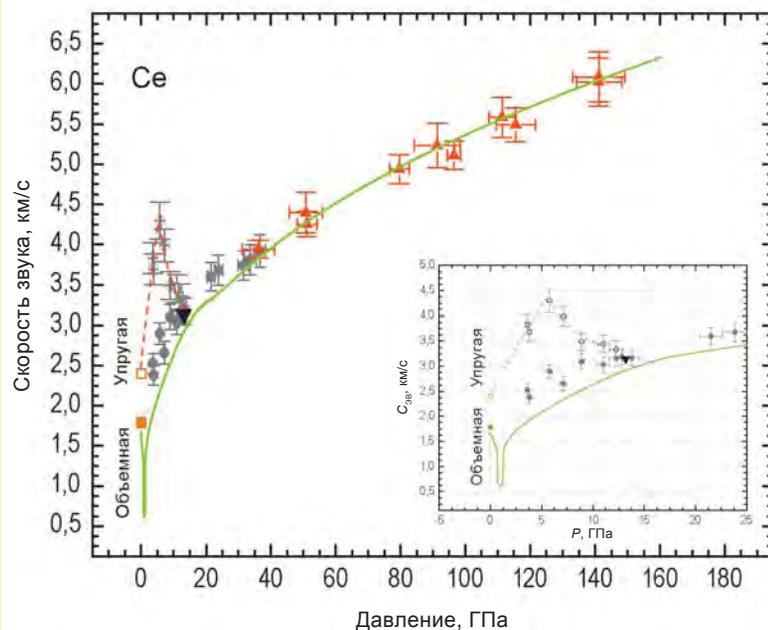


Численное моделирование результатов эксперимента:  
 — расчетные радиусы границ оболочек, обжимающих газ;  
 ● — экспериментальные средние радиусы оболочек

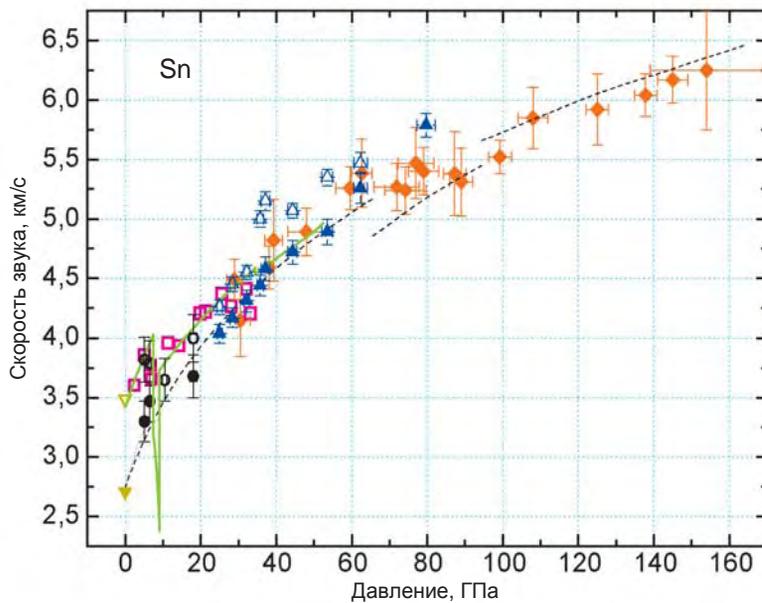
Завершен этап исследований фазовых превращений в церии, олове и природном уране по измерению в них скоростей звука за фронтом ударных волн. Церий обладает необычными по сравнению со многими металлами свойствами. К их числу относятся существование критической точки в твердом состоянии на линии изоморфного ( $\gamma$ - $\alpha$ ) превращения, аномальное поведение сжимаемости, теплового расширения, теплоемкости и др. Специфичность характеристик церия связана с особенностями изменения при сжатии структуры его электронной оболочки, обусловленными переходом 4f-электронов на уровень 5d. Сложная фазовая диаграмма церия, реализующаяся в области относительно невысоких давлений ( $P \leq 25$  ГПа), является причиной формирования многоволновой структуры как при его ударном сжатии, так и последующей разгрузке. Сложную фазовую диаграмму имеет также олово. Поэтому церий и олово являются удобными материалами для ударно-волновых исследований, направленных на получение многофазных УРС и прочностных характеристик.

Измерения скорости звука выполнены с помощью методик индикаторных жидкостей и манганинового датчика давления. По полученным зависимостям скорости звука от давления выявлены границы областей плавления для исследуемых металлов на ударной адиабате. Уста-

новлено, что церий находится в расплавленном состоянии при давлениях более 13 ГПа. Область плавления  $\gamma$ -Sn на ударной адиабате соответствует диапазону давлений 60–90 ГПа. Для природного урана диапазон давлений плавления составляет ~130–160 ГПа.



Зависимость скорости звука в церии от давления ударного сжатия:  
 - - - - аппроксимация; □, ●, ○, ▲ — данные ВНИИЭФ;  
 — расчет по УРС ВНИИЭФ; ▼, ■ — данные других авторов



Зависимость скорости звука в олове от давления ударного сжатия:  
 ▽, ○, ●, ◆ – данные ВНИИЭФ; ▾, □, ▲ – данные зарубежных авторов;  
 —, - - - - - расчетные кривые других авторов

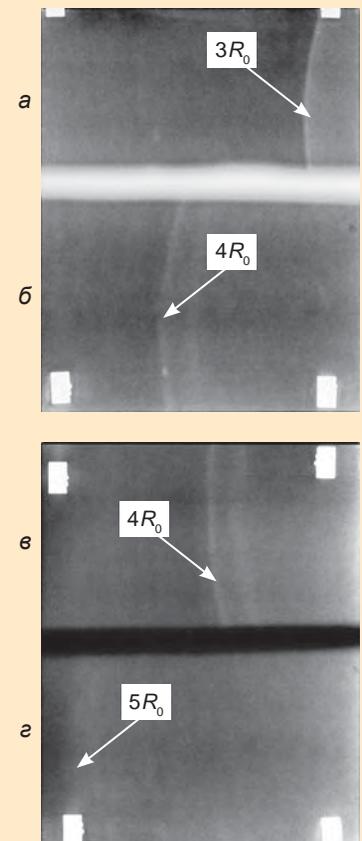
Определены параметры ударной волны – интенсивность и время действия, – при которых металлы (медь и тантал) испытывают разупрочнение. Известно, что с увеличением давления и деформации металлов в ударных волнах происходит изменение их микроструктуры – появляется большое количество микродвойников, плотность дислокаций достигает максимальных значений и в результате происходит упрочнение металлов. Однако на механические свойства и микроструктуру кроме амплитуды ударной волны ( $\sigma_x$ ) влияет и время ее действия ( $t_{yB}$ ). В сильных ударных волнах ( $\sigma_x > 70$  ГПа) реализуется температура, значительно превышающая температуру отжига. Чем выше температура, тем меньше необходимо времени для отжига и рекристаллизации металлов. Так, при воздействии на тантал ударной волны интенсивностью  $\sigma_x \approx 100$  ГПа и временем действия  $t_{yB} \approx 0,25$  мкс в микроструктуре наблюдаются полосы локализованного сдвига двойниковой природы. Толщина двойников 0,3–0,8 мкм, а их объем-

ная доля составляет ~15 %. При увеличении времени действия ударной волны до  $t_{yB} = 0,75$  мкс объемная доля микродвойников уменьшается до ~6 %. С увеличением времени действия ударной волны происходит снижение механических свойств меди и тантала. Проведенные исследования позволяют оценить время разупрочнения  $\tau$  исследуемых металлов в сильных ударных волнах. В меди  $\tau \geq 2$  мкс при  $\sigma_x = 70$  ГПа, в тантале  $\tau \geq 0,7$  мкс при  $\sigma_x = 100$  ГПа.

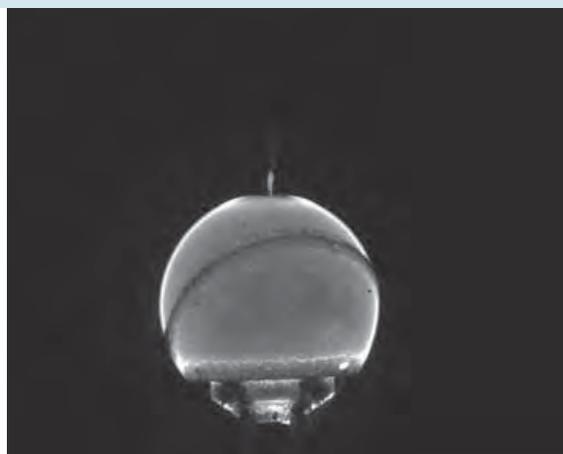
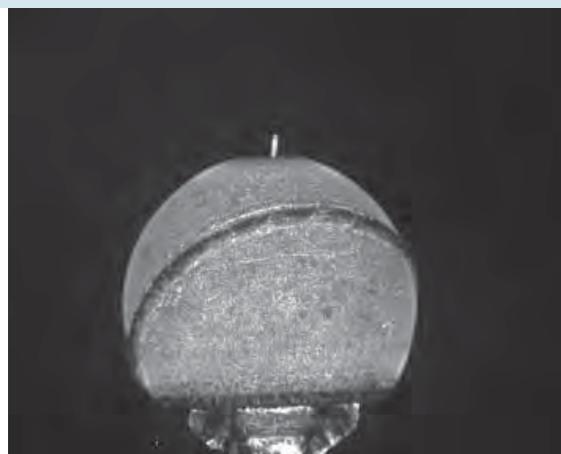
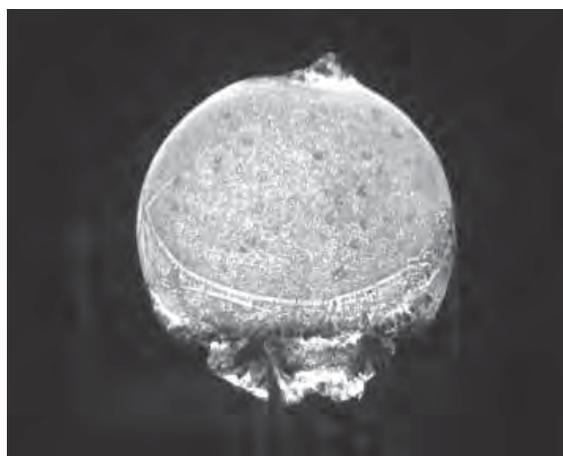
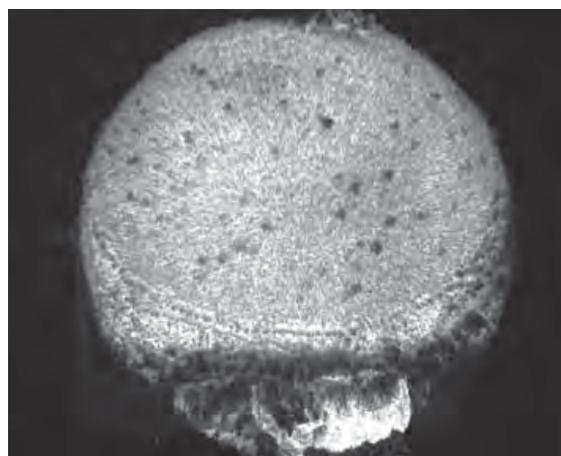
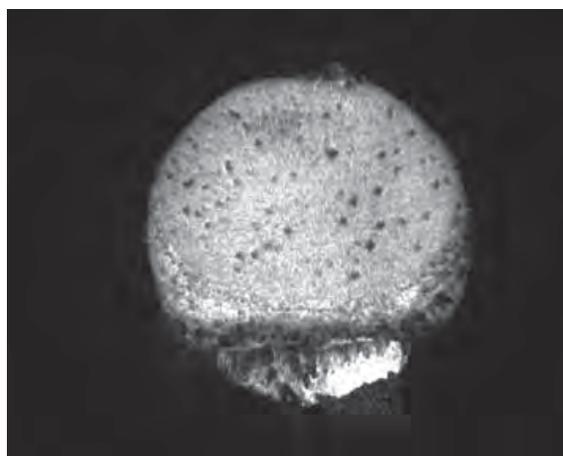
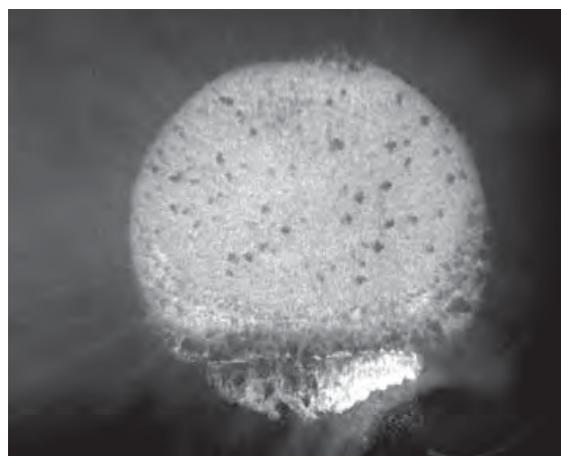
Проведены взрывные эксперименты по исследованию турбулизации границы раздела разлетающихся продуктов взрыва и воздуха на сферических зарядах, содержащих жидкую взрывчатую смесь тетранитрометана и нитробензола. Для регистрации зоны формирования воздушной ударной волны применялись:

- двухкадровая импульсная рентгеновская установка с граничной энергией гамма-квантов 1,0 МэВ и системы регистрации на основе фотохромных экранов;
- оптическая регистрация на основе матричных кремние-

вых сенсоров и системы оптического переноса с переменным фокусным расстоянием (обеспечивает фотосъемку полноформатного кадра с малой экспозицией (100–500 нс) с разрешением 1280 × 1024 пикселя). Выявленная на относительном радиусе  $4R_0$  двойная структура профиля плотности подтверждает возникновение и развитие зоны турбулентного перемешивания продуктов детонации и сжатого воздуха. С увеличением относительного радиуса регистрации на поверхности ударной волны появляются темные пятна (участки с пониженной температурой), их количество и размеры увеличиваются. Структура светящейся поверхности отражает процесс перемешивания «холодных» продуктов детонации и «горячего» сжатого в ударной волне воздуха.



Рентгенограммы зоны взаимодействия продуктов детонации и воздушной ударной волны на разные моменты времени:  
 а –  $t = 44$  мкс; б –  $t = 64$  мкс;  
 в –  $t = 64$  мкс; г –  $t = 94$  мкс

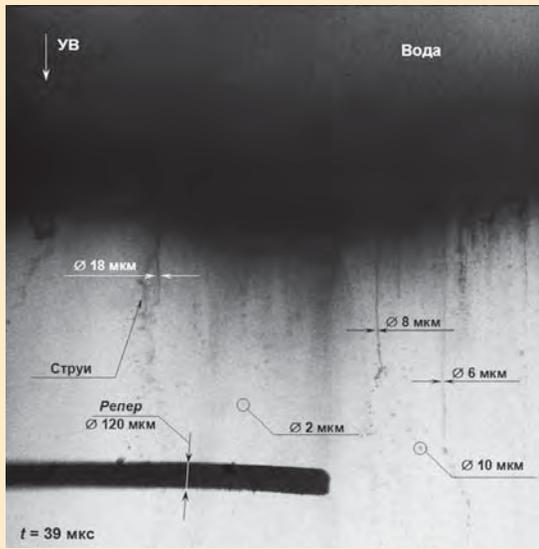
 $3R_0$  ( $t = 44$  мкс) $4R_0$  ( $t = 64$  мкс) $\sim 4R_0$  ( $t = 65$  мкс) $5R_0$  ( $t = 94$  мкс) $6R_0$  ( $t = 111$  мкс) $7R_0$  ( $t = 128$  мкс)

*Последовательные оптические изображения разлетающейся сферы продуктов детонации и светящейся воздушной ударной волны с возмущениями*

Начальная стадия процесса диспергирования жидкости под действием ударной волны является достаточно сложным и малоизученным процессом. При помощи

микроскопического электронно-оптического метода обнаружено, что из свободной поверхности ударно-нагруженной воды изначально выбрасываются тонкие (от единиц микрон) струи, которые

со временем распадаются на капли. Образование таких струй можно связать с наличием пузырьков газа в жидкости, которые определенным образом приводят к эффектам микрокумуляции.

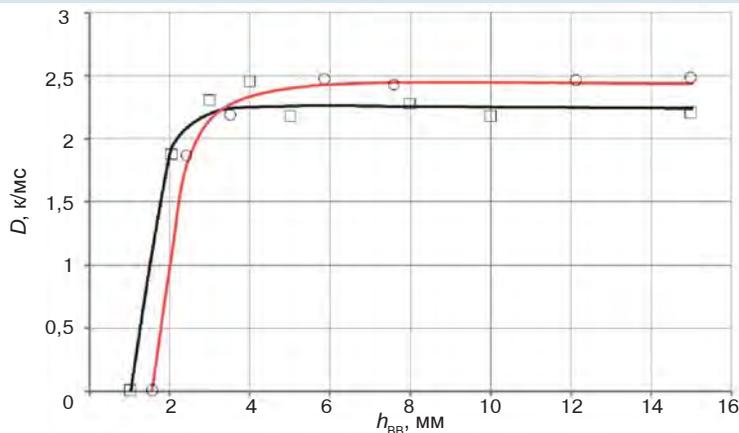


Видеокадры процесса диспергирования жидкости: а – выбрасываются тонкие струи; б – струи распадаются на капли

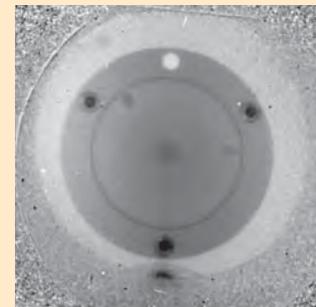
Проведены экспериментальные исследования по созданию новых смесевых ВВ на основе мощного вторичного ВВ (гексоген, ТЭН) и инертного «разбавителя» – бикарбоната натрия, имеющего большую газовую фазу при термическом разложении. Экспериментально подобраны соотношения компонентов смесевых ВВ, чтобы энергетические свойства недостающего количества высокобризантного ВВ компенсировались газовыделяющей функцией соды, выступающей в роли дополнительного компрессионного агента. Для решения задачи сварки взрывом предельно тонким зарядом ВВ с  $h \ll 8 \text{ мм}$

и низкой скоростью детонации исследовалась возможность снижения  $h$  смесей ТЭН/ $\text{NaHCO}_3$  и гексоген/ $\text{NaHCO}_3$ , в которых размеры кристаллов ТЭНа и гексогена составляют единицы микрометра. Эксперименты с такими ВВ по определению скорости детонации показали, что ВВ толщиной 2 мм детонирует устойчиво и только для слоя ВВ толщиной 1 мм было зарегистрировано затухание детонации.

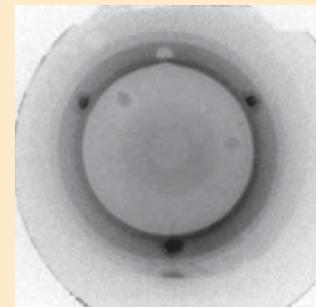
Ведутся исследования газодинамических процессов методом протонной многокадровой радиографии. Экспериментальные результаты используются для тестирования расчетных моделей.



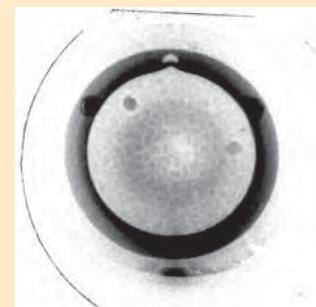
Зависимость скорости детонации от толщины слоя ВВ для ТС-микро (□) и GS-микро (O)



$t = 0 \text{ мкс}$

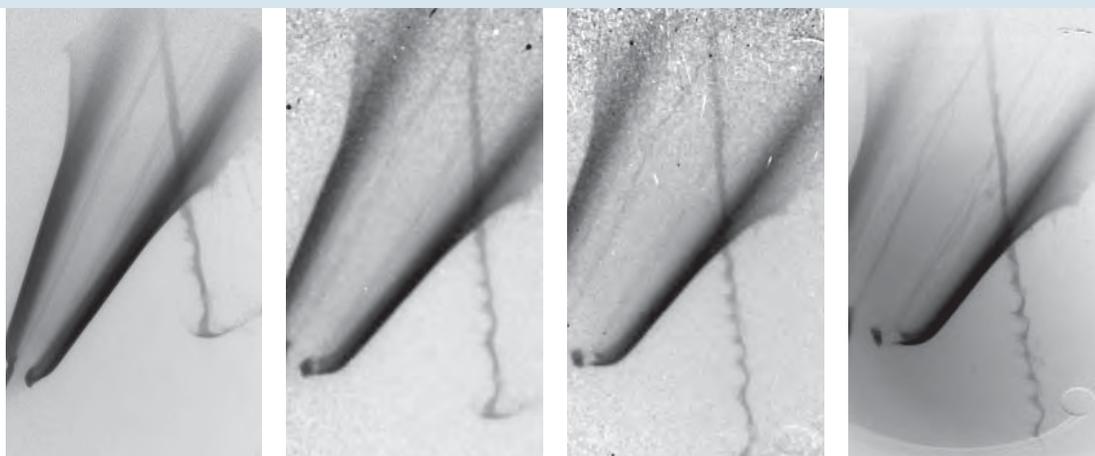


$t = 14,315 \text{ мкс}$



$t = 15,635 \text{ мкс}$

Процесс дробления полусферической оболочки из стали с внутренним диаметром 16,3 мм, толщиной стенки 0,4 мм



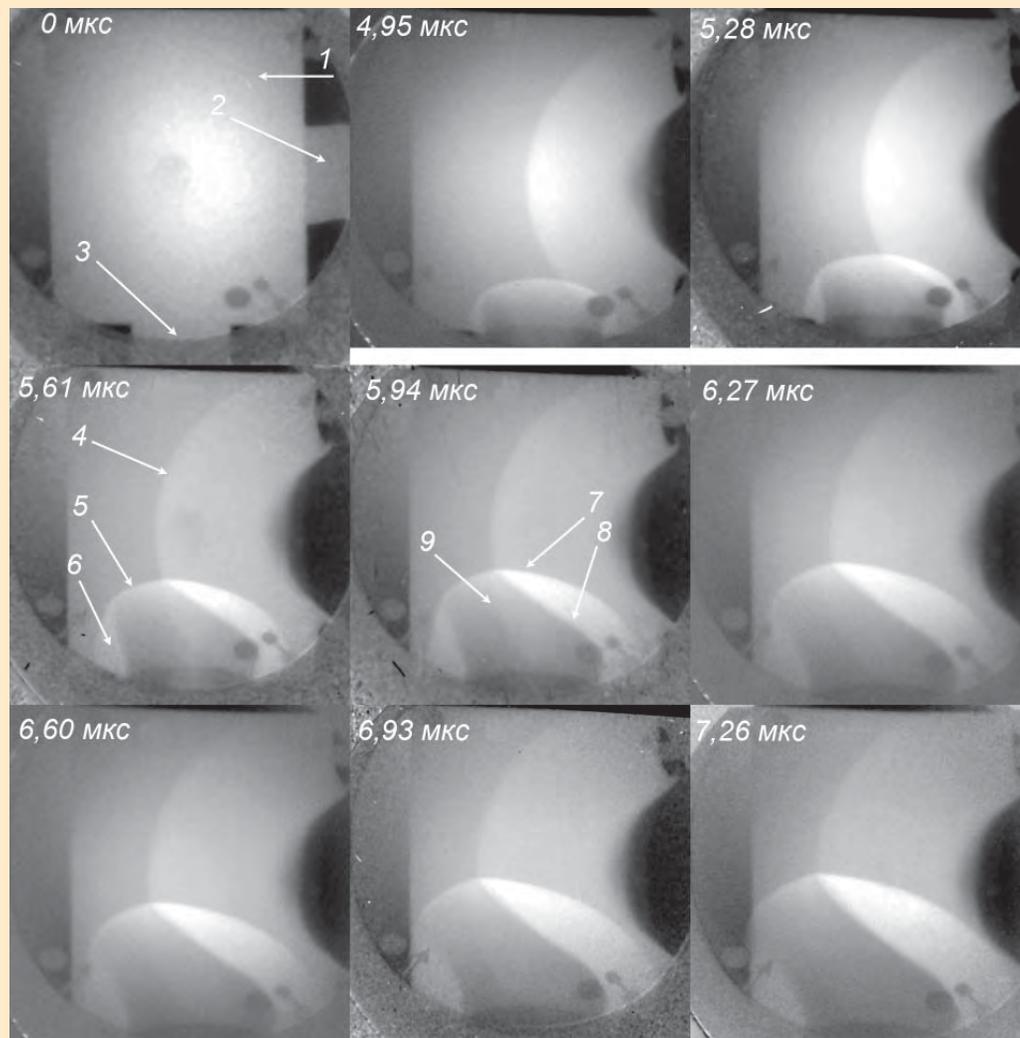
Кадр 1 (29,505 мкс)

Кадр 4 (30,825 мкс)

Кадр 7 (32,145 мкс)

Кадр 10 (33,63 мкс)

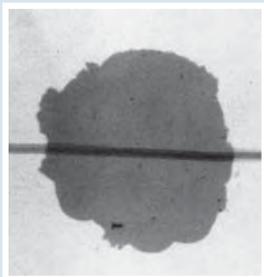
*Взаимодействие кумулятивной струи с макетом «реактивной» преграды*



*Процесс иницирования и развития детонации: 1 – образец; 2 – инициатор ударной волны; 3 – инициатор детонационной волны; 4 – фронт ударной волны; 5 – фронт детонационной волны; 6 – «темная» зона; 7 – фронт ударной волны в сжатой области; 8 – контактная граница; 9 – фронт ударной волны в продуктах взрыва*



Проведено испытание снарядоформирующего заряда с компактным поражающим элементом (ПЭ) из тантала, предназначенного для ракетной системы залпового огня «Ураган». По сравнению со штатной конструкцией, использующей ПЭ из меди, бронепробитие увеличено в 1,85 раза. Отклонение ПЭ от точки прицеливания не превысило 25 см. Это результат мирового уровня и рекордный для России.



Рентгенограмма поражающего элемента

В настоящее время единственным прямым способом изучения поведения структуры вещества на микроскопическом уровне непосредственно за ударным фронтом является импульсная рентгенодифракционная методика. Для изучения структуры кристаллов при ударном нагружении создан лабораторный комплекс. В качестве генератора импульсных давлений до 70 ГПа в лабораторных условиях создана электропушка ЭП-4, позволяющая разгонять тонкие диэлектрические ударники энергией взрыва фольги до скоростей в несколько километров в секунду. Емкость батареи электропушки в режиме разряда 25,5 мкФ, напряжение разряда 60 кВ, запасенная электрическая энергия  $E = 46$  кДж. Площадь ударника 32 × 80 мм. Использование ударников различной толщины позволяет изменять ско-

рость полета ударника от 0,5 до 8 км/с: при толщине ударника 2 мм скорость полета ударника равна 2,7 км/с, а при толщине ударника 50 мкм – 8 км/с. Источником импульсов рентгеновского излучения служит созданная сотрудниками ИЯРФ газоразрядная камера с плазменным фокусом. Длительность импульса рентгеновской эмиссии камеры 5–7 нс. Автоматизированная система регистрации рентгенодифракционных картин ударно сжатых кристаллов построена на базе электронно-оптического преобразователя и цифровой ПЗС-камеры. На динамических снимках зарегистрированы отражения от равновесных и неравновесных состояний, которые указывают на незавершенность процесса релаксации структуры от одноосно-сжатого состояния к изотропно-сжатому состоянию за время пребывания вещества на ударном фронте.

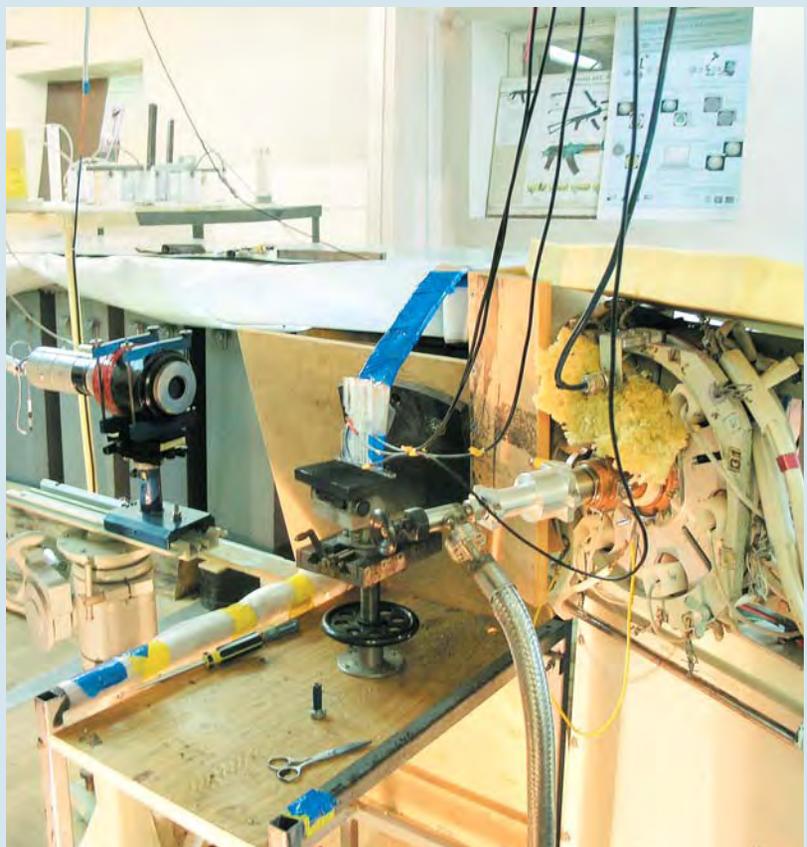


а

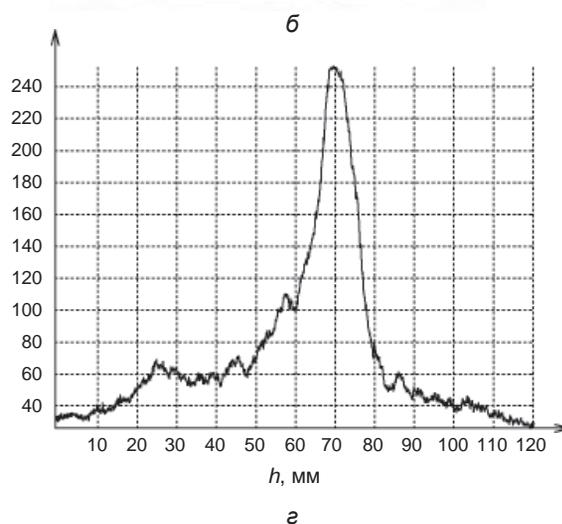
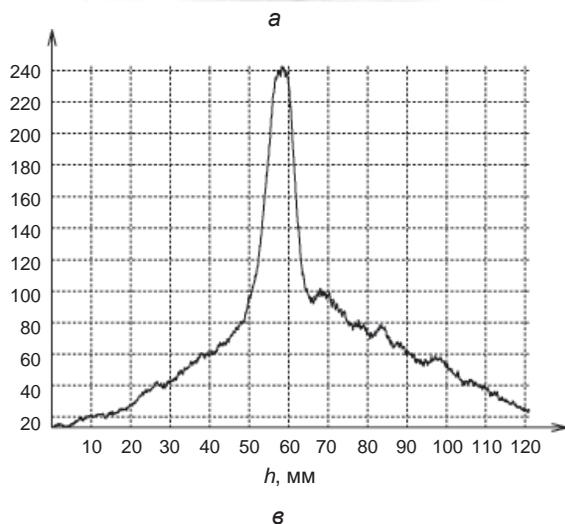


б

Фотографии пробитой бронепреграды:  
а – лицевая поверхность;  
б – тыльная поверхность

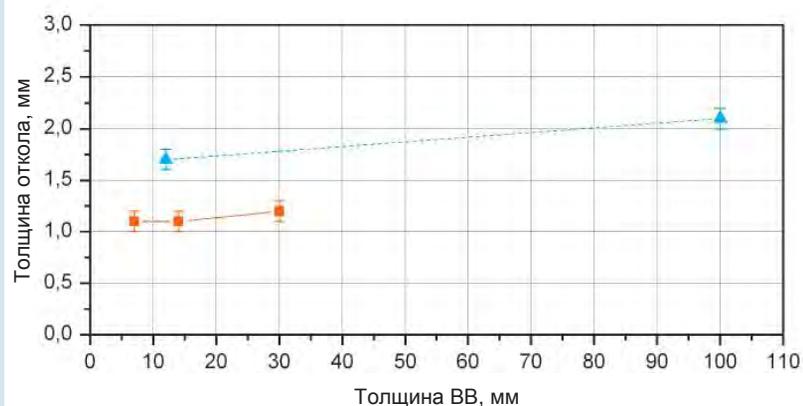


Лабораторный комплекс



Рентгенодифракционные картины и профили оптической плотности поперечных сечений предварительного (а, в) и динамического (б, г) снимков монокристалла LiF (скорость полета ударника из оргстекла 1,7 км/с, давление в образце 6,6 ГПа, относительное сжатие 1,09)

Проведены исследования откольного разрушения образцов бериллия при нагружении нестационарной ударной волной интенсивностью ~30 ГПа. Одновременно применялись несколько методик регистрации: двухкадровая импульсная рентгенография, лазерные интерферометры Майкельсона (ЛИМ, VISAR) и манганиновые датчики. Нагружение образцов осуществлялось детонационной волной заряда ВВ ТГ 5/5. При ударно-волновом нагружении бериллия зарегистрирована слабая зависимость толщины откола от толщины нагружающего заряда ВВ, тогда как для подавляющего числа металлов наблюдается монотонное увеличение толщины откола с увеличением толщины ВВ.



Зависимость толщины откола от толщины заряда ВВ для образцов бериллия 7 мм (■) и 20 мм (▲)



## ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

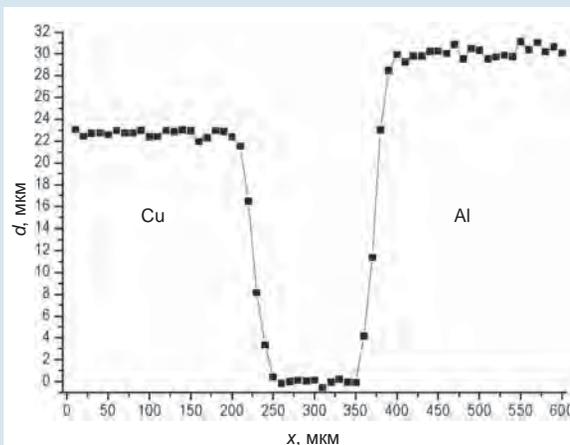
В исследованиях по физике высоких плотностей энергии и лазерному термоядерному синтезу используются микромишени сферической, цилиндрической и плоской геометрии. Требования к точности их изготовления и измерения параметров очень высоки (около 1%). Для измерения ряда параметров создан рентгеновский стенд. При измерениях применяются совместно абсорбционный и флуоресцентный методы анализа. Наибольшая точность измерений (1–2%) достигается

при использовании в качестве зондирующего излучения единичной спектральной линии. Минимальный размер зондирующего пучка  $10 \times 100$  мкм. В состав стенда входят: набор рентгеновских трубок со стабилизированным источником питания, блок вторичных мишеней с фильтрами и коллиматором, два рентгеновских спектрометра, вакуумная камера, система микроперемещений образцов и лазерная система юстировки. С помощью стенда проводятся измерения габаритных

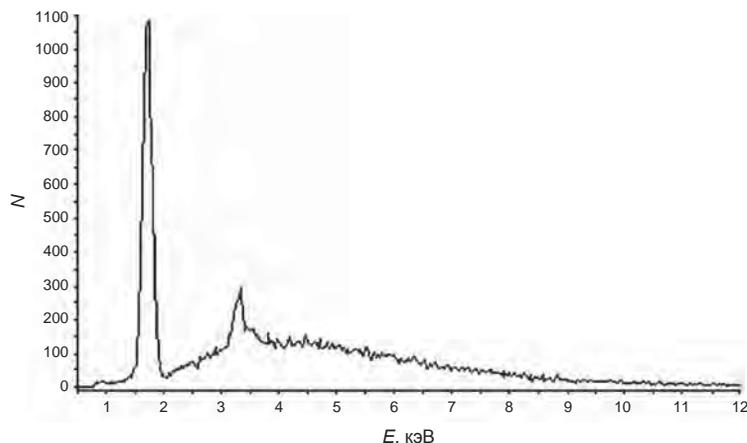
размеров мишеней, толщины пленок как одного материала, так и многослойных. Возможна регистрация профиля оптической плотности путем сканирования зондирующего пучка по поверхности образца. Диапазон измеряемых толщин составляет от 10 нм до 100 мкм. С помощью стенда возможно измерение количества трития и других газов с  $Z > 12$  в мишенях и приповерхностном слое конструкционных материалов. Минимально регистрируемое количество трития  $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  г.



Аппаратный спектр излучения насыщенного тритием стального образца, покрытого слоем золота



Распределение толщины слоев меди и алюминия, выполненных в виде ступенек на медной подложке толщиной 20 мкм



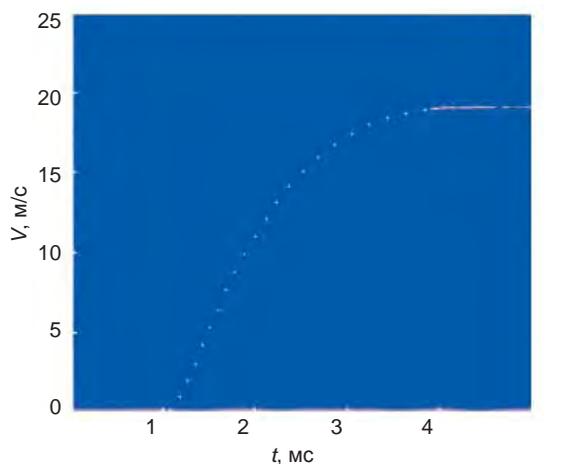
Спектр излучения стеклянной микросферы, наполненной тритием

Экспериментально на примере пневматически ускоренной пули показана возможность применения оптогетеродинного метода для синхронного измерения во времени скорости нескольких быстро движущихся объектов. Стенд измерений включал в себя пневматический пистолет, стреляющий сферическими пулями по различным мишеням; оптоволоконный лазер с длиной волны зондирующего излучения 1550 нм; коллиматор, формирующий каустическую зондирующего луча; фотодиод и осциллограф, регистриру-

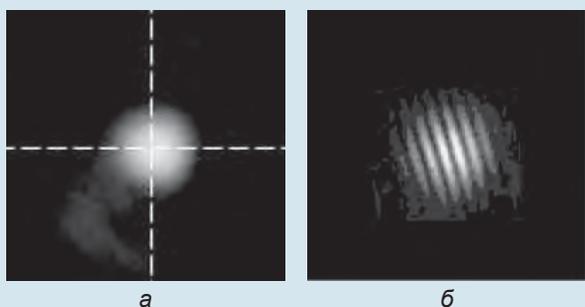
ющие отраженные от исследуемых объектов излучения. Экспериментально исследованы разгон пули в стволе пистолета, полет пули в воздухе и торможение в процессе удара о различные преграды; движение преград после удара пули. Максимальная скорость пули 100 м/с. Относительная ошибка измерения скорости данного метода ~1 %.

Проведены экспериментальные исследования вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ) вихревых лазерных пучков (мод Лагерра – Гаусса  $LG_0^1$  и  $LG_1^1$ ) в различных условиях фокусировки и при различной энергии импульса накачки. Продемонстрировано, что при ВРМБ вихревой лаггерр-гауссовой мо-

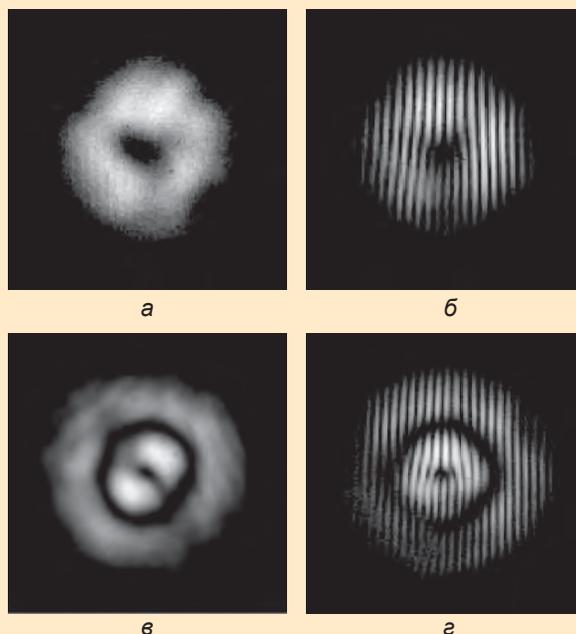
ды  $LG_1^1$ , прямо сфокусированной в кювету ВРМБ, наблюдается не обращение, а преобразование волнового фронта. Стоксов пучок является безвихревым и в околопороговом режиме представляет собой во многих случаях основную гауссову моду в соответствии с предсказаниями теории и расчетов. Показано, что обращение волнового фронта (ОВФ) вихревого лазерного пучка можно достичь при разрушении структуры моды в кювете ВРМБ. Получено ОВФ мод  $LG_0^1$  и  $LG_1^1$  высокого качества в ВРМБ-зеркале, включающем упорядоченный растр микролинз и угловой селектор в системе фокусировки лазерного пучка.



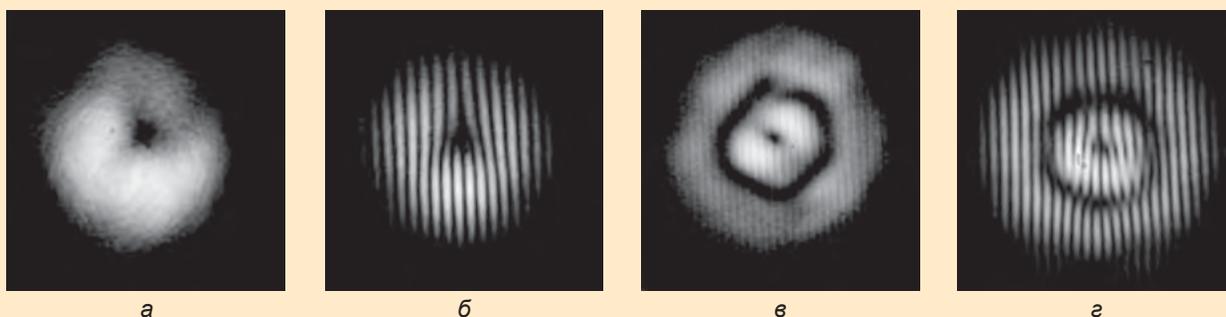
Разгон пули в стволе пневмопистолета



Интенсивность (а) и фазовый портрет (б) стоксова пучка вблизи порога ВРМБ в случае прямой фокусировки лазерной моды  $LG_1^1$  в кювету ВРМБ



Интенсивность (а, в) и фазовый портрет (б, г) лазерных мод  $LG_0^1$  (а, б) и  $LG_1^1$  (в, г)



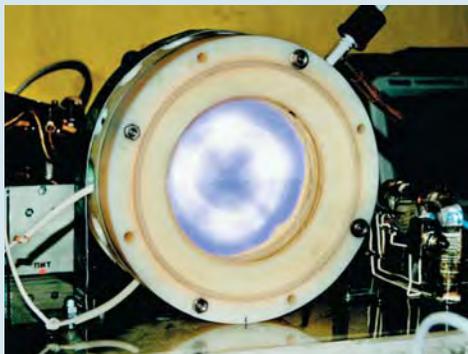
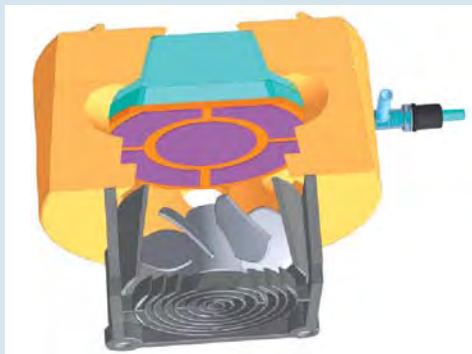
Интенсивность (а, в) и фазовый портрет (б, г) стоксовых мод в ВРМБ-зеркале с растром микролинз при накачке лазерной модой  $LG_0^1$  (а, б) и  $LG_1^1$  (в, г)



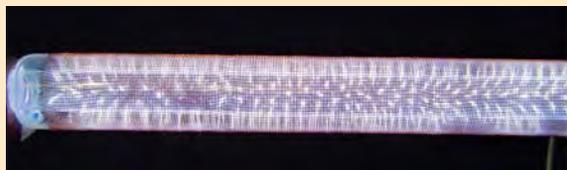
## ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

В ИЯРФ ведутся работы по созданию источников УФ-излучения на основе эксимерных ламп (эксилламп) барьерного разряда. Эксилламп имеют высокую эффективность (до 60 %), узкую линию излучения (2–20 нм) и широкий диапазон рабочих длин волн. УФ-излучение эксилламп может

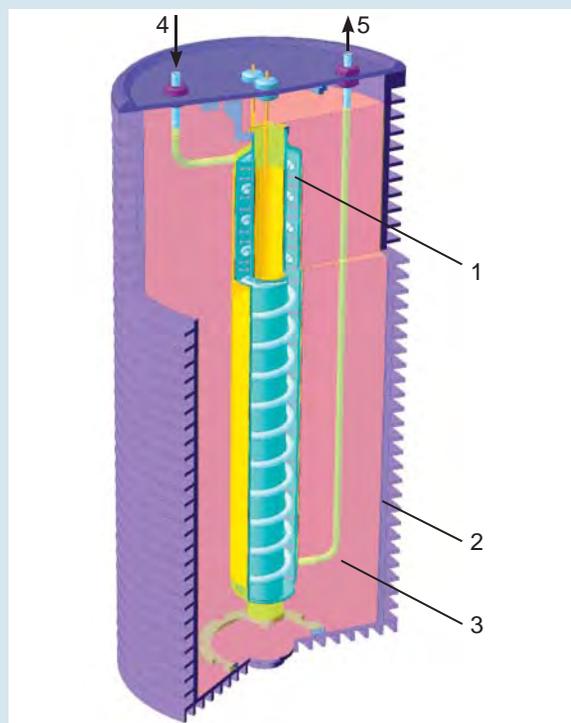
быть использовано для обработки и дезинфекции поверхностей, воды, воздуха, очистки трубных газов от вредных примесей, уничтожения микробов и др. К настоящему времени разработано несколько типов эксилламп барьерного разряда: 1) с планарным расположением электродов; 2) цилиндрической геометрии; 3) фотореакторы. Кроме того, проведены работы по оптимизации рабочих смесей, исследованы законы подобия газового разряда и термодинамические параметры эксилламп, изучено фоторазложение экотоксикантов при воздействии УФ-излучения.



Планарная эксиллампа с керамическими барьерами



Цилиндрическая эксиллампа барьерного разряда



Фотореактор барьерного разряда для обработки жидкостей и газов: 1 – канал циркуляции обрабатываемой жидкости (газа); 2 – корпус радиатора; 3 – масляная ванна; 4 – ввод обрабатываемой среды; 5 – вывод обрабатываемой среды

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ (НТЦФ)

В НТЦФ ведется работа над проектом взрывного электрофизического комплекса ЭМИР, предназначенного для зажигания термоядерных мишеней при радиационном обжати мягким рентгеновским излучением (МРИ). Энергетической основой комплекса ЭМИР являются многоэлементные дисковые взрывомагнитные генераторы нового поколения с диаметром заряда ВВ 480 мм (ДВМГ480). Испытания пятиэлементного ДВМГ480 подтвердили высокую эффективность устройства и работоспособность основных принципов, заложенных в его конструкцию. В нагрузке 7 нГн получен импульс тока амплитудой 90 МА при времени нарастания 6,5 мкс. Магнитная энергия составила 30 МДж. Увеличение числа элементов генератора ДВМГ480 до 15–20 обеспечит получение импульсов тока амплитудой до 150 МА и магнитной энергии в нагрузке не менее 100 МДж. Для укорочения фронта токовых импульсов взрывомагнитных генераторов используются электровзрывные (ЭВРТ) и взрывные (ВРТ) размыкатели. ЭВРТ, традиционно используемые совместно с дисковыми генераторами, в реальных лайнерных нагрузках обеспечивают укорочение фронта импульса тока до ~1 мкс. ВРТ, обладающие рядом преимуществ по сравнению с ЭВРТ, обычно используются с быстроходными спиральными ВМГ, обеспечивая сокращение времени нарастания импульса тока в лайнерах до 0,3–0,4 мкс при амплитуде тока ~5 МА. При создании формирователей тока для комплекса ЭМИР впервые разработан и успешно испытан ВРТ для дискового генератора, выполненный в виде отдельно-

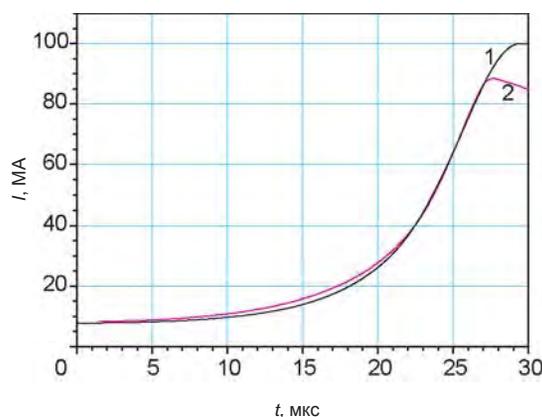
го блока, что позволило реализовать преимущества устройства (высокая эффективность разрыва токнесущего проводника при оптимальном, не зависящем от работы генератора, выборе момента разрыва). При разрыве контура пятиэлементного ДВМГ240 с током 15,4 МА в нагрузке индуктивностью 6,8 нГн зарегистрирован импульс тока 9,3 МА с характерным временем нарастания 0,57 мкс. Успешные испытания базовых конструкций дискового генератора и ВРТ позволили

разработать основной вариант модуля энергетической системы комплекса ЭМИР – устройство в составе 15-элементного ДВМГ480 и ВРТ, которое обеспечивает импульсы тока амплитудой 50–70 МА при времени нарастания 0,5–1 мкс.

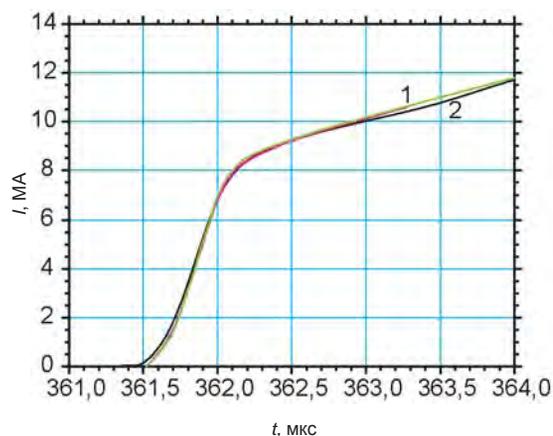
Генерация МРИ в устройствах, разрабатываемых в интересах комплекса ЭМИР, обеспечивается традиционным способом за счет ускорения в осевом направлении под действием пондеромоторных сил продуктов электрического взрыва



*ДВМГ480-5 на взрывной позиции*



Импульс тока ДВМГ480-5:  
1 – расчет; 2 – эксперимент

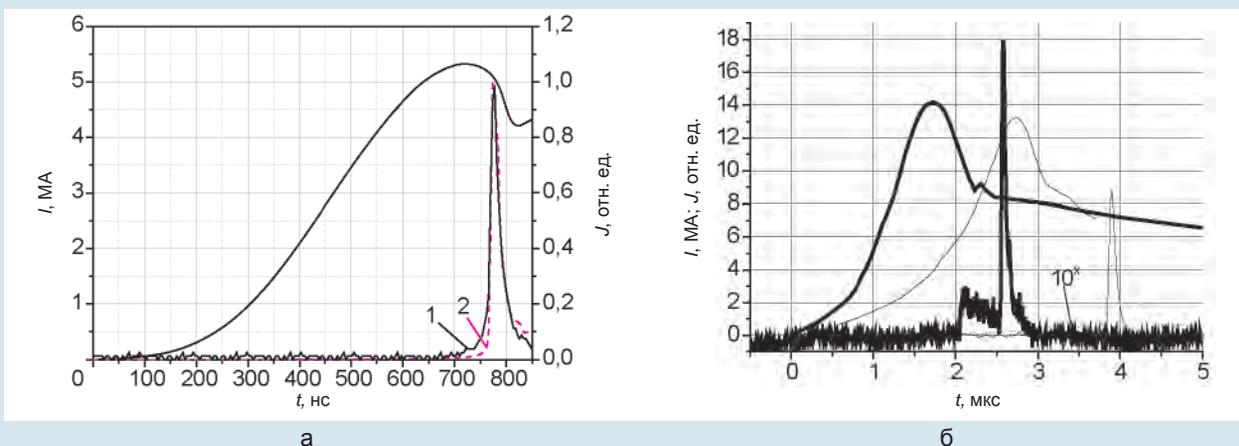


Укорочение фронта импульса ДВМГ240 взрывным  
размыкателем тока: 1 – магнитооптический датчик;  
2 – индуктивные датчики

цилиндрических многопроволочных каркасов и последующей термализации их кинетической энергии на оси системы. Проведенные к настоящему времени исследования взрывных источников МРИ были направлены в основном на создание методов и средств реализации и контроля такого механизма во взрывных экспериментах. Была разработана уникальная технология изготовления многопроволочных лайнерных систем, выдерживающих транспортировку на значительные расстояния и сохраняющих свою геометрию независимо от пространственной ориентации. Созданы средства диагностики токовых импульсов в различных сечениях формирователя тока, в том числе и непосредственно в лайнерной системе, а также средства диагностики основных параметров лайнерной плазмы и МРИ. Исследования взрывных источников МРИ проводились параллельно с разработкой формирователей тока. При этом в экспериментах по генерации МРИ использовались доступные на данный момент источники тока и геометрия лайнерной системы выбиралась в соответствии с пара-

метрами их токовых импульсов. К настоящему времени экспериментально показана эффективность и перспективность генерации МРИ при использовании в качестве источников питания формирователей тока на основе взрывомагнитных генераторов. При запитке многопроволочного лайнера (200 вольфрамовых проволочек диаметром 8 мкм, диаметр лайнера 60 мм, высота 15 мм) током 5,3 МА с временем нарастания 0,3 мкс от быстрого спирального ВМГ200 с ВРТ воспроизводимым образом обеспечивается генерация импульсов МРИ длительностью на полувысоте 20 нс с энергосодержанием 180 кДж, температура плазмы пинча составляет 65 эВ. Генератор ДВМГ240 с ЭВРТ обеспечивает в двухкаскадной лайнерной системе (внешний каскад – 720, внутренний каскад – 360 проволочек из вольфрама диаметром 11 мкм, диаметры каскадов: внешнего 200 мм, внутреннего 100 или 140 мм, высота каскадов 25 мм) импульс тока с временем нарастания 1–1,6 мкс. Укорочение фронта импульса тока при прочих равных условиях ведет к сокращению времени имплозии пинча с 3,8 до 2,5 мкс и дли-

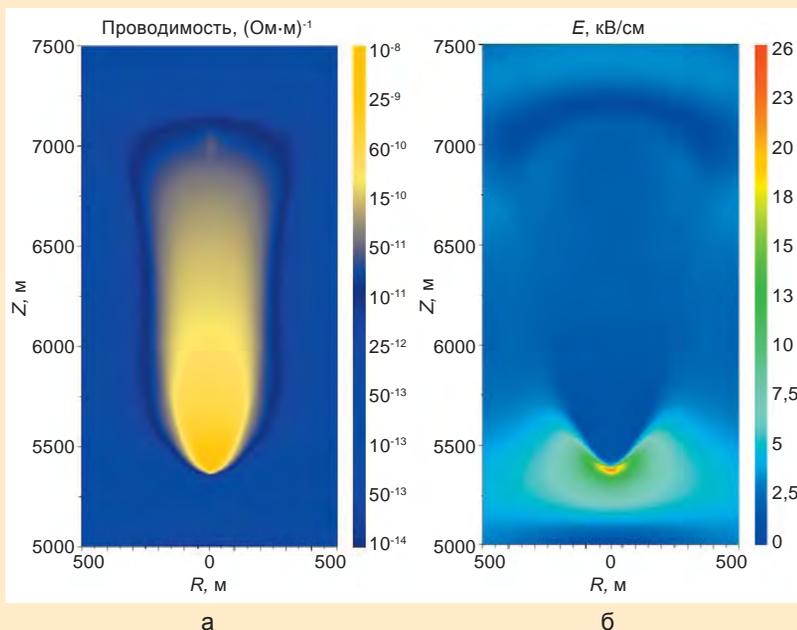
тельности импульса рентгеновского излучения с 70 до 55 нс, а также к повышению температуры плазмы пинча с 40 до 55 эВ. Энергия рентгеновского излучения 500–900 кДж. Расчетно-теоретическое сопровождение работ по созданию мощных взрывных источников МРИ обеспечивается с помощью разработанного сотрудниками НТЦФ двумерного радиационного магнитогидродинамического кода, модернизированного путем перехода к описанию переноса излучения в многогрупповом диффузионном приближении (ранее использовалось одногрупповое приближение) и учета растянутого во времени процесса начального плазмообразования при электровзрыве многопроволочных лайнеров. Созданный программный продукт обеспечивает адекватное воспроизведение большинства экспериментальных результатов и позволяет выполнять прогнозные расчеты при подготовке редакции экспериментов по генерации МРИ с использованием взрывных источников тока.



Импульсы тока и МРИ для ВМГ-200 (а) и ДВМГ240 (б): 1 – эксперимент; 2 – расчет с «навязанным» током

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Решалась одна из проблем физики атмосферного электричества: инициирование разряда молнии. Для старта молнии напряженность электрического поля в грозовом облаке должна достичь пробивного уровня, обеспечивающего лавинообразное размножение электронов: отношение напряженности к давлению должно составлять 2,6–3 МВ/(м·атм) для пробоя (breakdown) сухого воздуха и 1,0–1,4 МВ/(м·атм) при наличии осадков (precipitations). Однако обычно это соотношение не превышает 0,3–0,4 МВ/(м·атм). Выполнено численное моделирование механизма инициирования молнии вследствие усиления поля в результате поляризации плазменного канала, созданного лавинами релятивистских убегающих электронов, иницируемые фоновым космическим излучением. Показано, что для реалистичных конфигураций и величин зарядов грозового облака локально реализуются поля, при которых возможен старт лидера молнии даже в отсутствие осадков. Результаты расчетов согласуются с данными натурных наблюдений усиления проникающей радиации в грозовых облаках.



Пространственное распределение проводимости в канале (а) и напряженности поля (б) в момент достижения пробивного уровня

Разработана плазмофокусная разрядная камера, рассчитанная на получение во взрывном эксперименте с током 1,5 МА выхода ДТ-нейтронов  $10^{13}$  имп.<sup>-1</sup> при работе с равнокомпонентной ДТ-смесью. Используя мощную конденсаторную батарею – установку КАСКАД, отработаны режимы

стабильной работы плазмофокусной камеры при тех же уровнях энергетики тока, что и в предстоящем взрывном эксперименте. Максимальная энергоемкость установки 820 кДж; в экспериментах использовалась только часть батареи с запасаемой энергией ~200 кДж. В камере с дейтериевым наполнением получен



устойчивый выход нейтронов  $\sim 10^{11}$  имп. $^{-1}$  при максимальных разрядных токах  $\sim 1,3$  МА. В экспериментах на установке КАСКАД

получены данные для расчета конструкции взрывного размыкателя тока, способного обеспечить в планируемом взрывном

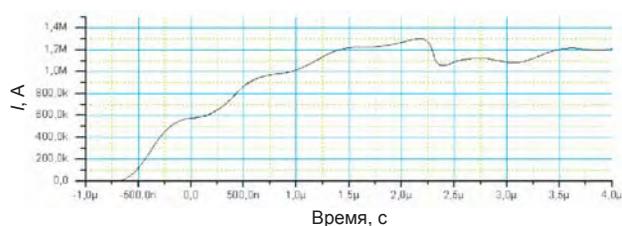
эксперименте амплитуду тока  $\sim 1,5$  МА при заданной форме импульса напряжения на входе плазмфокусной камеры.



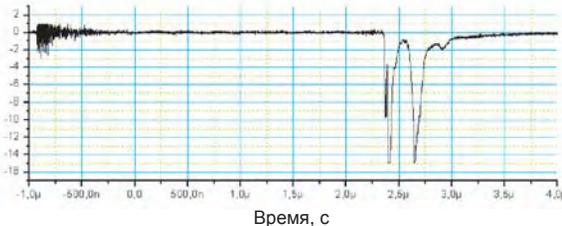
Плазмфокусная разрядная камера



Установка КАСКАД

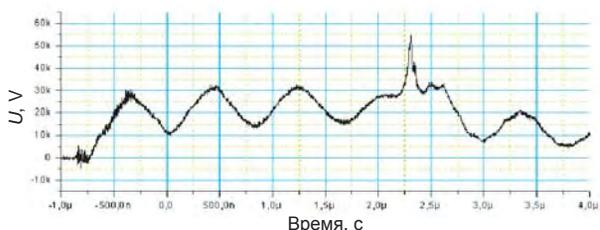


а

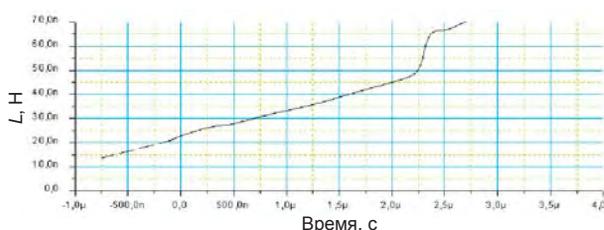


б

Осциллограммы тока в камере (а) и сигнала датчика проникающих излучений (б)



а



б

Типичные зависимости от времени напряжения на входе в камеру (а) и индуктивности камеры (б)

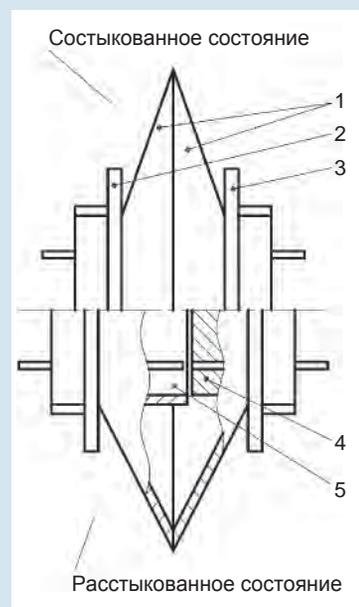
## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Для предотвращения негативных последствий в случае пожара и перегрева в конструкциях ответственных изделий используются специальные устройства – размыкатели электрической цепи (РЭЦ). В технологическом отделе разработана принципиально новая конструкция необратимого РЭЦ типа вилка-розетка, в которой для изготовления термочувствительного и исполнительного привода применяется сплав с памятью формы (СПФ) (патент РФ № 2402124). Этот размыкатель также может использоваться в качестве критического датчика повышения температуры. Рабочий привод из СПФ при повышении температуры окружающей среды до порогового значения формоизменяется, воздействуя тем самым на элементы размыкателя, и гарантированно размыкает электрическую цепь. Наиболее оптимальной является конструкция рабочего привода в виде набора тарельчатых деталей, изготовленных из СПФ. В результате исследований выявлено статистически значимое влияние количества циклов наведения деформации на характеристические температуры начала и окончания восстановления формы без потери эффекта памяти. Восстанавливаемая деформация составляет 5–5,5 мм. Максимальное усилие, которое могут разви-

вать при нагревании установленные в пакет тарельчатые детали, значительно превышает максимальное усилие разъединения вилки-розетки. Разработана схема РЭЦ с рабочим приводом из СПФ применительно к конструкции серийно выпускаемого автоматического выключателя тока ВА-57-35-330010 для работы в электрических сетях с напряжением 660 В и максимальным током нагрузки 250 А. Область применения – различные отрасли промышленности и транспорт. При изготовлении рабочего привода за счет подбора химического состава сплавов с памятью формы, их термической обработки, величины, скорости и/или количества циклов наведенной деформации может быть обеспечен конкретный температурный порог аварийного необратимого размыкания электрической цепи в диапазоне от 50 до 160 °С в зависимости от требований. В подобных РЭЦ, основанных на применении биметаллов, возможно многократное использование рабочих приводов из СПФ и контроль температуры срабатывания при приемосдаточных испытаниях каждого изготовленного из СПФ привода до его монтажа; они отличаются компактностью, экологичностью, простотой и высокой надежностью в эксплуатации.

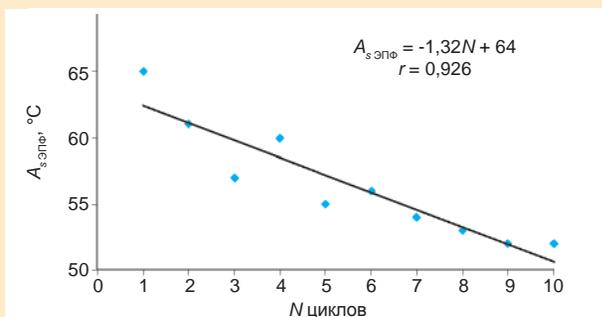


а

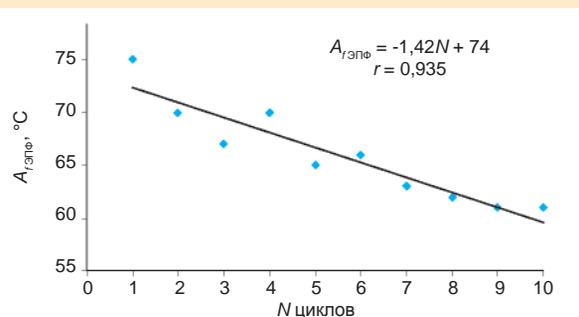


б

Макет (а) и схема (б) РЭЦ с рабочим приводом в виде пакета тарельчатых деталей, изготовленных из СПФ:  
1 – набор тарельчатых деталей;  
5 – вилка с фланцем 2;  
4 – розетка с фланцем 3



а



б

Зависимость температуры начала  $A_{s\_элф}$  (а) и окончания  $A_{r\_элф}$  (б) восстановления формы от количества циклов наведения деформации тарельчатой детали, изготовленной из сплава TiNi марки TH1

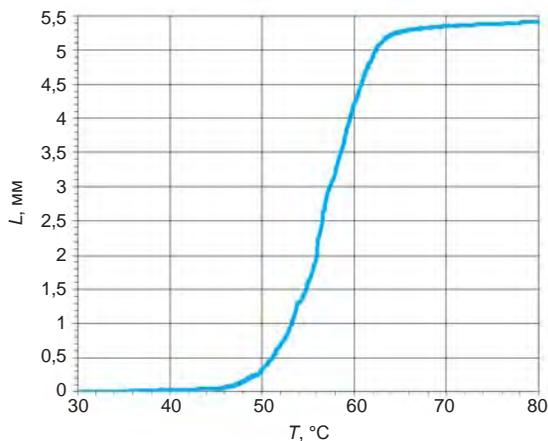


Диаграмма восстановления формы рабочего привода в виде пакета тарельчатых деталей в макете РЭЦ

## КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

Для исследования процессов, протекающих при высокоскоростном ударе, созданы взрывные метаемые устройства, использующие кумулятивный эффект:

- Кумулятивное взрывное метаемое устройство типа «полусфера-цилиндр» (ПЦ) с покрытой металлической облицовкой кумулятивной выемкой. Экспериментально отработана конструкция устройства, позволяющая разгонять стальные компактные элементы массой 100 г до скорости 6,2 км/с.

- Устройство, использующее нагружение облицовки в форме «полусфера-цилиндр» маховой детонационной волной (ПЦ-М). Экспериментально отработана конструкция устройства, позволяющего разгонять стальные компактные элементы массой 10 г до скорости 8 км/с.

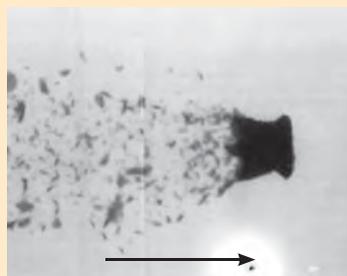
В 2007–2010 годах для проведения высокоскоростных (>2000 м/с) испытаний на ракетном треке РЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ОКБ «Союз» (г. Казань) разработан специальный твердотопливный двигатель ДТР5. Проведены его предварительные ис-

пытания и отработка на ракетном треке. Созданы ракетные поезда (РП), оснащенные данными двигателями, с использованием которых впервые достигнута скорость разгона объектов испыта-

ний  $V = 2050–2250$  м/с. При этом успешно решен ряд проблем, возникающих при высокоскоростном движении РП по направляющим трека, связанных с запуском ступеней, аэродинамиче-



а

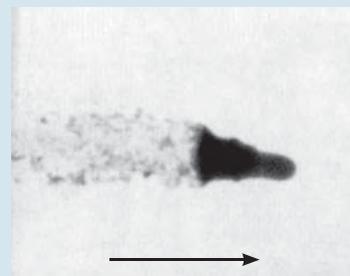


б

Взрывное метаемое устройство ПЦ (а) и рентгенограмма формируемого им компактного элемента (б)



а



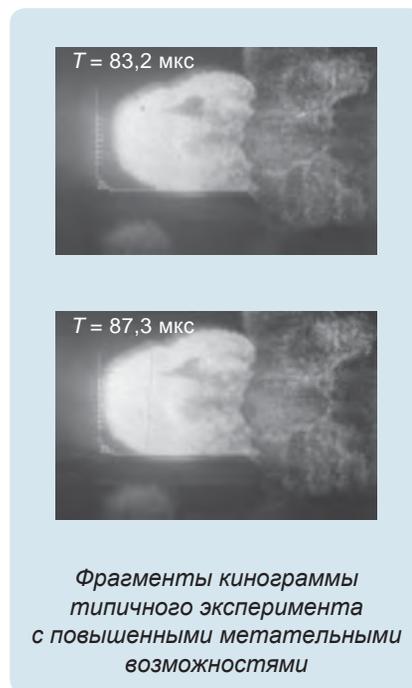
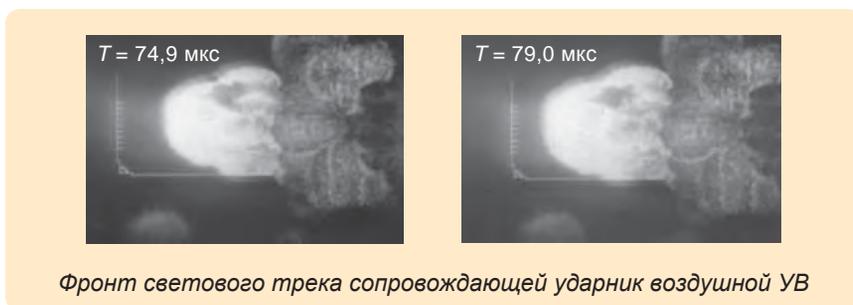
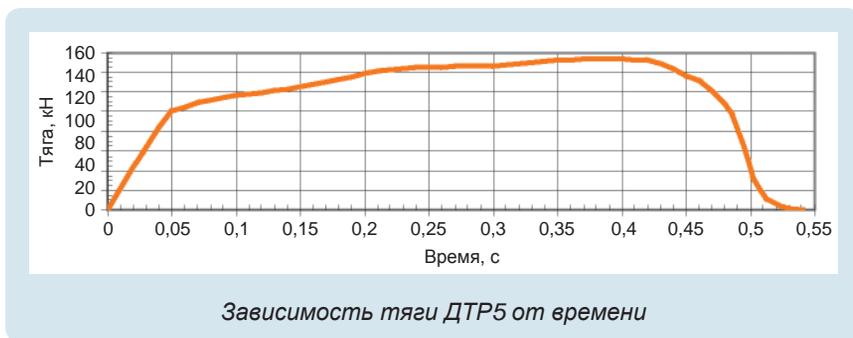
б

Взрывное метаемое устройство ПЦ-М (а) и рентгенограмма формируемого им компактного элемента (б)

ским нагревом, износом башмаков (связывающих средства разгона с направляющими) и кре-

ном ступеней РП. В перспективе возможно достижение скоростей разгона до 2500 м/с.

Для испытания различных конструкций создано и экспериментально опробовано устройство, основанное на повышении метательных возможностей за счет удержания давления в продуктах взрыва основного заряда ВВ с помощью дополнительных боковых слоев ВВ. В результате становится возможным взрывной разгон плиты толщиной 60 мм до скорости 3 км/с в случае стального ударника, 5 км/с – алюминиевого и 6,5 км/с – ударника из оргстекла. Поперечные размеры сформированного ударника значительно превышают его толщину, он имеет плоскую нагружающую поверхность и безградиентное распределение скорости.



# 2010