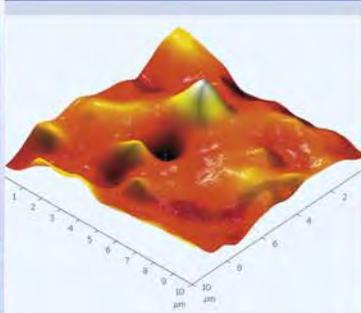
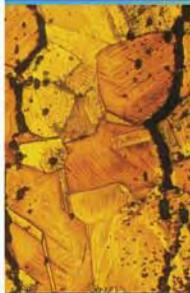


ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

2007

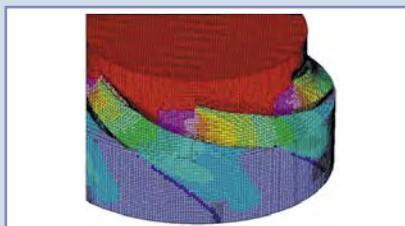


САРОВ
2008

СОДЕРЖАНИЕ

2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



15

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА



28

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ



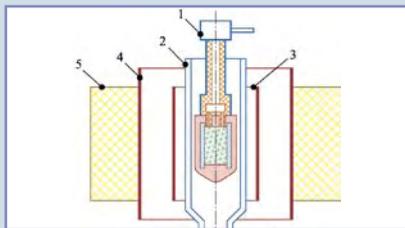
32

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ



35

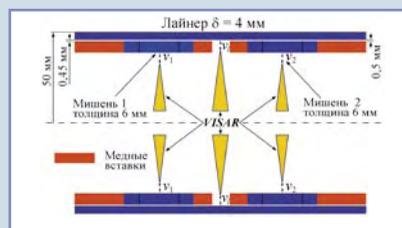
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ
ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ



Подписано в печать 15.04.2008 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4. Уч.-изд. л. 3,5.
Тираж 600 экз. Зак. тип. 789-2008.
Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
607190, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23

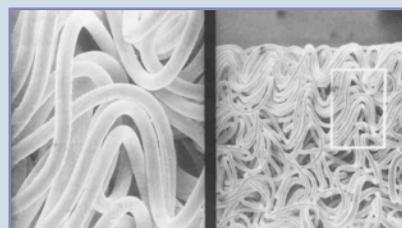
36

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



40

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



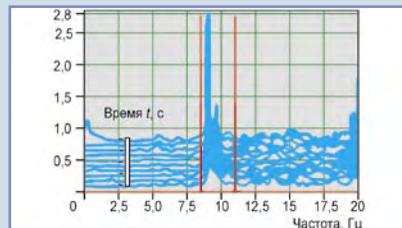
41

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО



44

ОТДЕЛЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ



РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА:

академик РАН Р. И. Ильяев;
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

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДГОТОВКА
ОРИГИНАЛА-МАКЕТА**

Т. В. Андреева, В. В. Ельцов



9 октября 2008 года научному руководителю РФЯЦ-ВНИИЭФ академику РАН Радио Ивановичу Илькаеву исполняется 70 лет. Научно-технические достижения Р. И. Илькаева по укреплению национальной безопасности отмечены тремя Государственными премиями, премией Правительства РФ, благодарностями Президента России, орденом «За заслуги перед Отечеством» III степени, орденом Почета. Р. И. Илькаеву присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ». Награжден Золотой медалью Российской академии наук имени А. Д. Сахарова.

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Настоящее время характеризуется стремительным прогрессом вычислительной техники, с одной стороны, и бурным развитием методов математического моделирования, т. е. численного эксперимента, с другой стороны. Ученые и специалисты в различных областях знаний смогли приступить к решению таких задач, которые не поддавались ранее полномасштабному компьютерному моделированию и требовали обязательного экспериментального исследования.

Главным направлением работ теоретических и математического подразделений ИТМФ в последние годы является создание качественно новой расчетно-теоретической базы моделирования физических процессов в задачах механики сплошных сред, физики высоких плотностей энергии и других областях, входящих в тематику основной деятельности Института.

Специалистами ИТМФ достигнут значительный успех в создании программ нового поколения для полномасштабного многомерного моделирования работы ядерного оружия, разработке новых физико-математических моделей и развитии математических методик и комплексов программ для численного моделирования физических процессов как по основной тематике института, так и по мирной или «конверсионной» тематике. Особое внимание в последние годы уделялось разработке высокопараллельных комплексов программ, способных проводить многомерные расчеты на большом числе процессоров с высокой степенью эффективности. Интенсивному развитию и внедрению параллельных методик в производственные расчеты способствовал ввод в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ ряда высокопроизводительных вычислительных систем.

В 2007 году получены значимые результаты в разработке методик и программных комплексов нового поколения для проведения высокоточного компьютерного моделирования сложных физических процессов. В частности, завершена разработка математической методики КОРОНА для расчета двумерных задач физики высоких плотностей энергии (газовая динамика, теплопроводность и детонация ВВ). Методика и программный комплекс сданы в опытную эксплуатацию. Методика КОРОНА основана на неявных разностных схемах и использовании переменного по размеру разностного шаблона при получении конечно-разностных уравнений как для уравнений газовой динамики, так и для уравнения теплопроводности.

Основные характеристики методики и комплекса программ КОРОНА:

- Позволяет лагранжевым методом отслеживать контактную границу между веществами вдоль всех пространственных направлений.

- Обеспечивает хорошую точность расчетов за счет использования переменного по размеру разностного шаблона.

- Позволяет рассчитывать задачи высоких плотностей энергии различных веществ, задачи со сложными газодинамическими течениями, в том числе сильные вихревые и струйные течения, раскомпактацию и обратную компактацию областей веществ.

- Обеспечивает высокий уровень «безаварийности» расчетов за счет использования современных методов и программ автоматического поддержания качественной расчетной сетки.

- Позволяет проводить многомерные расчеты в параллельном режиме на многопроцессорных ЭВМ, что существенно сокращает календарные сроки расчетов.

Разработана методика ТИМ-2D и на ее базе создан комплекс программ для расчета двумерных задач газовой динамики, упругопластичности, детонации, теплопроводности, магнитной гидродинамики (МГД) с учетом диффузии магнитного поля в многообластной постановке на нерегулярных сетках с произвольным количеством связей в узлах. Для расширения класса задач по магнитной гидродинамике разработаны дополнительные методики и программы по расчету магнитных полей в трех приближениях. Комплекс программ позволяет проводить расчеты в последовательном и параллельном режимах счета. В методике ТИМ-2D предусмотрено трехуровневое распараллеливание. На первом (верхнем) уровне распараллеливание осуществляется по математическим областям. На втором уровне — по параобластям внутри математической области (мелкозернистое распараллеливание). На первых двух уровнях используется модель распределенной памяти и интерфейс передачи сообщений MPI. На третьем (нижнем) уровне распараллеливаются итерации счетных циклов в модели общей памяти с использованием интерфейса OpenMP. Три уровня распараллеливания могут использоваться по отдельности, попарно в различных сочетаниях и все вместе при решении одной и той же задачи. Для расчета связанных задач МГД разработаны алгоритмы и созданы программы связи с методиками моделирования процессов переноса частиц и излучения С-95 (метод Монте-Карло). Развивались методики и комплекс программ ТИМ для расчета трехмерных задач газовой динамики, упругопластичности, детонации, теплопроводности, магнитной гидродинамики с учетом диффузии магнитного поля в многообластной постановке

на нерегулярных сетках с произвольным количеством связей в узлах. Для методики ТИМ реализовано распараллеливание в модели общей памяти с использованием интерфейса OpenMP. Для построения расчетных сеток реализована программа ТИМ-РНД. В программе ТИМ-РНД разработано и реализовано три метода построения нерегулярных многогранных сеток. Методы базируются на полистовом построении на основе двумерной сетки, послойном построении на основе поверхностной сетки, построении сетки диаграммы Вороного. Использование данных методов позволяет строить сетки для трехмерных тел со сложными геометриями. Для расчета процессов двухпоточковой газовой динамики реализовано распараллеливание в моделях смешанной памяти, распределенной памяти с использованием MPI и общей памяти с использованием OpenMP.

Сдан в эксплуатацию программный комплекс, основанный на связи методик САТУРН-2005 (решение многогруппового кинетического уравнения переноса частиц и излучения в двух- и трехмерных геометриях) и РАМЗЕС-КП (решение уравнений газовой динамики и теплопроводности в многомерной геометрии), для расчетов на многопроцессорных ЭВМ. Проведены первые двух- и трехмерные расчеты новых классов задач по основной тематике ВНИИЭФ.

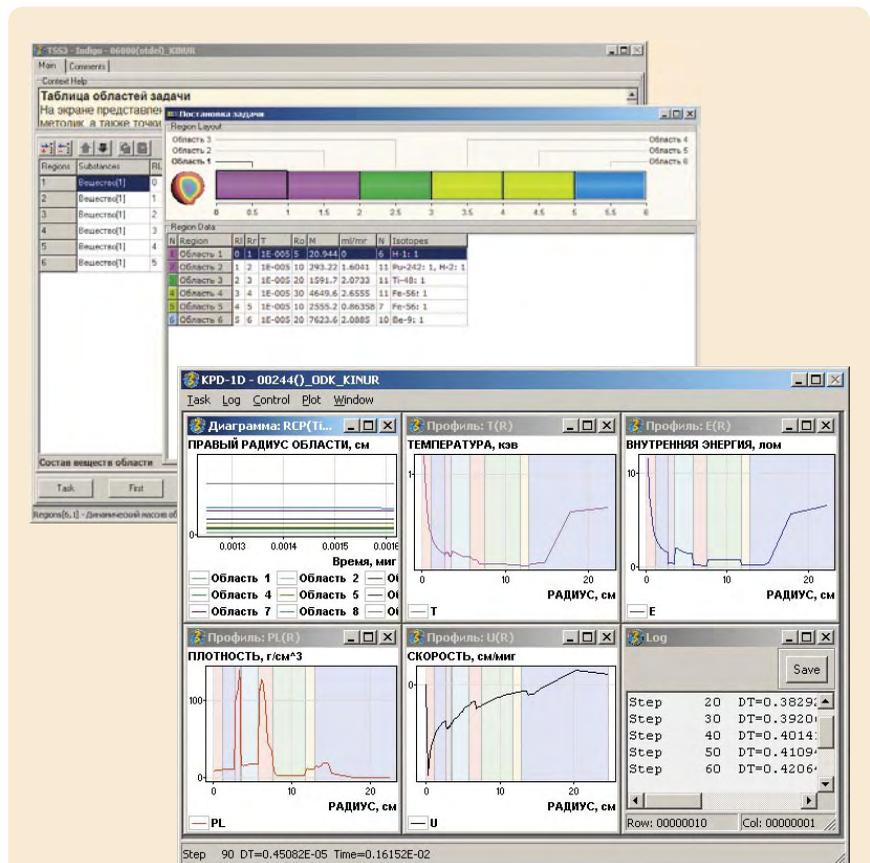
Сдан в эксплуатацию программный комплекс для расчетов в параллельном режиме двумерных газодинамических процессов одновременно с расчетом методом Монте-Карло переноса нейтронов и гамма-квантов, изменения энергии системы с использованием различных спектральных ядерно-физических данных. При расчете процесса переноса учитывается газодинамическая скорость движения ядер среды и их тепловое движение. Моделирование переноса осуществ-

ляется на сферической или цилиндрической или интерполяционных сетках Монте-Карло. В комплексе применен оригинальный способ расщепления и распараллеливания связанных (газодинамика + перенос частиц) задач.

Разработана методика СОЛЯРИС и создан программный комплекс для решения многомерных задач переноса излучения и теплопроводности с учетом газодинамического движения вещества и других физических процессов на многопроцессорных ЭВМ. Методика СОЛЯРИС предназначена для численного решения на многопроцессорных 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. Поставленные задачи

комплекс может решать как самостоятельно, так и совместно с другими газодинамическими методиками и программами.

Сдан в эксплуатацию программный комплекс для расчета задач газовой динамики, переноса частиц и излучения в одномерной геометрии. Особенностью комплекса является тот факт, что он объединяет возможности практически всех одномерных методик, эксплуатируемых в математическом отделении ИТМФ. Комплекс оснащен единым для всех методик графическим интерфейсом для задания входной информации к расчетам, динамического сопровождения расчетов и постпроцессорной обработки результатов счета. Современный интуитивно понятный пользовательский интерфейс позволяет проводить массовые расчеты задач специалистами ядерного центра без участия разработчиков комплекса.

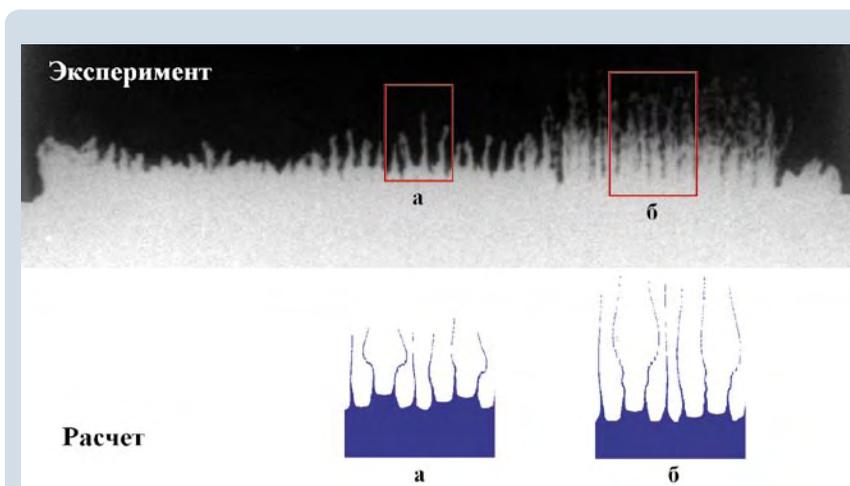


Задание входной информации к расчету по комплексу одномерных программ и динамической визуализации различных величин в процессе счета задачи

Традиционно в ИТМФ значительное внимание уделяется совершенствованию и разработке новых физико-математических моделей, их адаптации и внедрению в математические методики, а также развитию и совершенствованию математических методик, комплексов программ и их связей для совместного учета различных физических процессов при численном моделировании различных прикладных задач. В 2007 году по этому направлению получены важные результаты.

Совместными усилиями теоретиков, математиков ИТМФ и экспериментаторов ИФВ исследованы некоторые аспекты процесса кумулятивной неустойчивости свободной поверхности конденсированных материалов при выходе на эту поверхность ударных волн. В рамках методики ЛЭГАК усовершенствованы расчетные модели, позволяющие учитывать влияние на развитие процессов реологических свойств материалов, подвергаемых ударно-волновому нагружению. В частности, построена физико-математическая модель развития локальных возмущений на свободной поверхности в неньютоновых жидкостях. Эта модель позволила описать экспериментально зафиксированную немонотонность зависимости скорости нарастания возмущений от геометрических параметров начальных возмущений. В расчетах по методике ЛЭГАК описаны опыты, в которых помимо возмущений на свободной поверхности присутствовали возмущения на фронте ударной волны (гофрировка фронта).

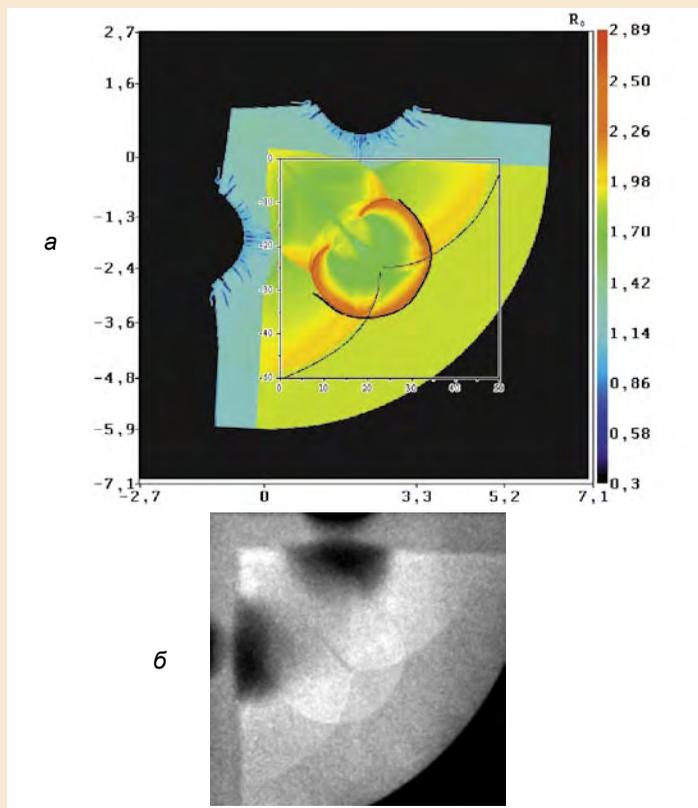
В методике ЛЭГАК были подобраны параметры модели кинетики МК для ВВ на основе октогена и воспроизведена двумерная картина, полученная в рентгенографических опытах, проведенных в ИФВ. В экспериментах исследовалось изменение ударно-волновой чувствительности при взаимодействии



Форма возмущений, на развитие которых оказывает влияние гофрировка фронта ударной волны. На экспериментальном образце видны зоны с различающимися начальными возмущениями: а — амплитуда возмущений $A_0 = 0,18$ мм, б — $A_0 = 0,35$ мм

ударных и детонационных волн в таких ВВ. Зарегистрированы особенности инициирования чувствительного ВВ на основе октогена по сравнению с нечувствительными составами на основе ТАТБ.

Разработана методика численного решения трехмерных уравнений Максвелла, описывающих распространение широкополосного электромагнитного импульса в полном параболическом излучателе.



Численное моделирование поля плотности (а) и рентгенография (б) (линиями отмечено положение фронтов ударных и детонационных волн)

Создана программа, реализующая эту методику, проведен ряд расчетов представительных тестовых задач с целью изучения аппроксимирующих свойств разностной схемы, положенной в основу методики. Проводится апробация программы на расчетах задач с параметрами, характеризующими опытный образец излучателя.

С использованием метода частиц и конечно-разностного метода решения $1d2p$ -релятивистского уравнения Власова проведены сравнительные расчеты для задачи о развитии неустойчивости Вейбеля и задачи взаимодействия короткоимпульсного лазерного излучения с плазмой. Эти расчеты показали возможность решать двумя численными методами определенные классы задач динамики плазмы, что повышает достоверность результатов.

На примере модельной задачи расчета электромагнитного импульса ядерного взрыва исследована точность высокочастотного приближения для уравнений Максвелла с целью возможного расширения временной области его применимости. Установлено, что сохранение в

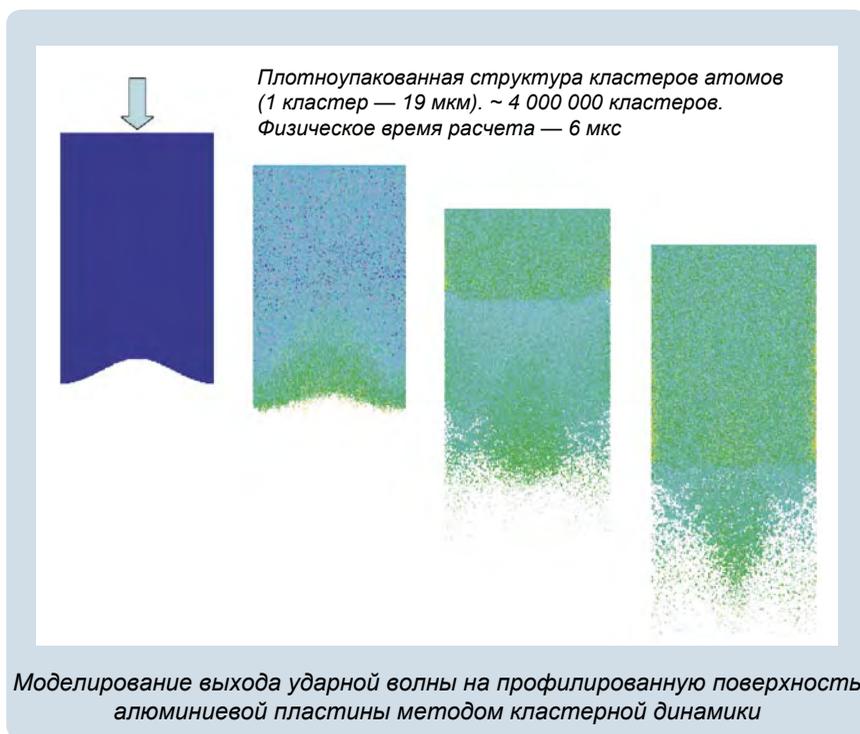
уравнениях Максвелла производных по угловым переменным существенно увеличивает интервал по времени, на котором решение уравнений высокочастотного приближения хорошо согласуется с решением исходных уравнений.

Продолжалось интенсивное развитие методик молекулярно-динамического моделирования МД:

- Оработана технология МД-моделирования и проведена серия расчетов в параллельном режиме «больших» задач развития радиационных каскадов в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке меди с обработкой результатов по распознаванию и визуализации точечных и объемных дефектов кристаллической структуры.

- Оработана технология и освоены расчеты задач разрушения материалов методом кластерной динамики. Проведена серия расчетов задачи выхода ударной волны на профилированную поверхность с обработкой результатов расчетов с выдачей спектра (по размерам) частиц пыли, образующейся в процессе выхода ударной волны на свободную поверхность.

В программе исследований по инерциальному синтезу большое внимание уделяется 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 позволяет проводить в секторном приближении спектральные расчеты на базе серии одномерных расчетов по одномерному комплексу программ радиационной и газовой динамики СНД. Данный подход дает возможность проводить вычисления с учетом неравновесного характера и трехмерных особенностей распределения полей излучения, исследовать реальные конструкции мишеней (в том числе конструкции, не обладающие осевой симметрией). Проведены расчеты спектральной неоднородности рентгеновского облучения капсулы в экспериментах по инерциальному синтезу на установке «Искра-5». Результаты расчетов показывают, что в экспериментах со сферическими боксами ($\lambda = 1,315$ мкм) среднеквадратичная неоднородность облучения капсулы составляет $\sim 3\%$. В области энергии жестких квантов $E_\gamma = 2,5 - 3$ кэВ присутствует резкий пик неоднородности освещенности капсулы на уровне $15 - 30\%$. Это обстоятельство может существенно сказываться на работе ряда конструкций, в частности, мишеней с каскадным усилением. Однако в типичных экспериментах со стеклянными газонаполненными оболочками толщиной $3 - 5$ мкм его влияние незначительно. Перевод установки «Искра-5» на вторую гармонику ($\lambda = 0,657$ мкм), как показывают результаты численного моделирования, привел к изменению условий облучения мишеней и, как следствие, к увеличению неоднородности рентгеновского облучения капсулы до уровня 5% . С помощью

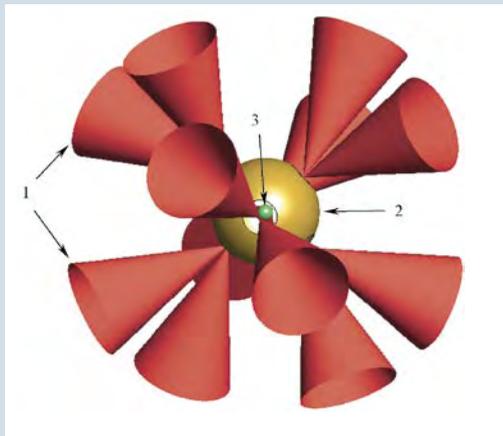


численной методики СНД-ЛИРА проведены расчеты динамики полей излучения (рентгеновского и лазерного) в цилиндрических боксах-конверторах. Неоднородность облучения капсулы с

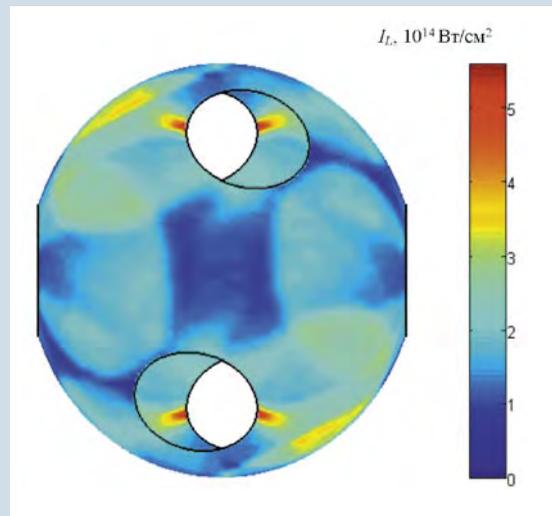
термоядерным топливом в этих экспериментах оказывается существенно выше.

Как и ранее, большое внимание в 2007 году в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ уделялось работам,

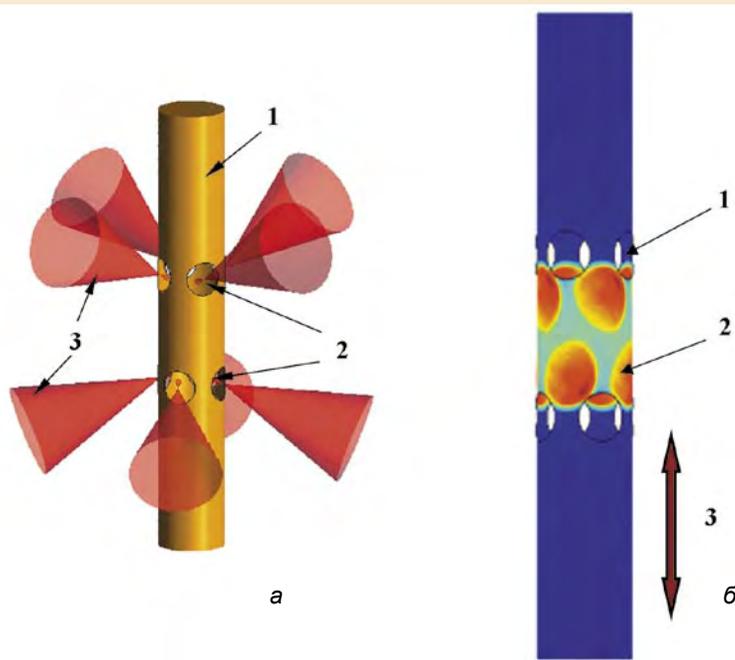
связанным с совершенствованием баз ядерно-физических данных, данных по уравнениям состояния веществ и пробегам излучения. Так, в интересах усовершенствования моделей



Эксперимент с рентгеновскими мишенями со сферическими боксами-конверторами на установке «Искра-5»: 12 лазерных пучков (1) вводятся во внутренний объем сферического бокса (2) через 6 отверстий и нагревают внутреннюю поверхность бокса; генерирующееся в боксе рентгеновское излучение воздействует на капсулу (3), заполненную Д-Т смесью



Распределение интенсивности поглощения лазерного излучения на внутренней поверхности сферического бокса в модельном расчете с коэффициентом поглощения $k_a = 0,5 \cos^3 \gamma$



Лазерная освещенность цилиндрического бокса: а — конструкция мишени и схема ввода лазерных пучков (1 — цилиндрический бокс, 2 — отверстия, 3 — лазерные пучки); б — распределение интенсивности поглощенного лазерного излучения на внутренней поверхности бокса в модельном расчете с коэффициентом поглощения $k_a = 0,5 \cos^3 \gamma$ (1 — отверстия, 2 — первичные лазерные пятна, 3 — направление изменения потока рентгеновского излучения)

уравнений состояния веществ с целью расширения области их применимости и повышения точности описания экспериментальных данных:

- Завершена разработка на основе УРС РОСА-М и модели ТФПК (Томаса — Ферми с поправками) широкодиапазонного уравнения состояния $Pu-\alpha$ для расчетов термодинамических свойств этого вещества во всей реализуемой в прикладных расчетах области значений температур и плотностей. Это уравнение подготовлено и введено в пакет УРС-ОФ для использования в прикладных программах.

- Завершена работа по построению сплайн-УРС для ряда металлов по данным, полученным на основе модели МВДВ Копышева — Медведева (модифицированная модель

Ван-дер-Ваальса). Выполнены паспортизация этих УРС и ввод их в библиотеку УРС-ОФ. Ведутся производственные расчеты с их использованием.

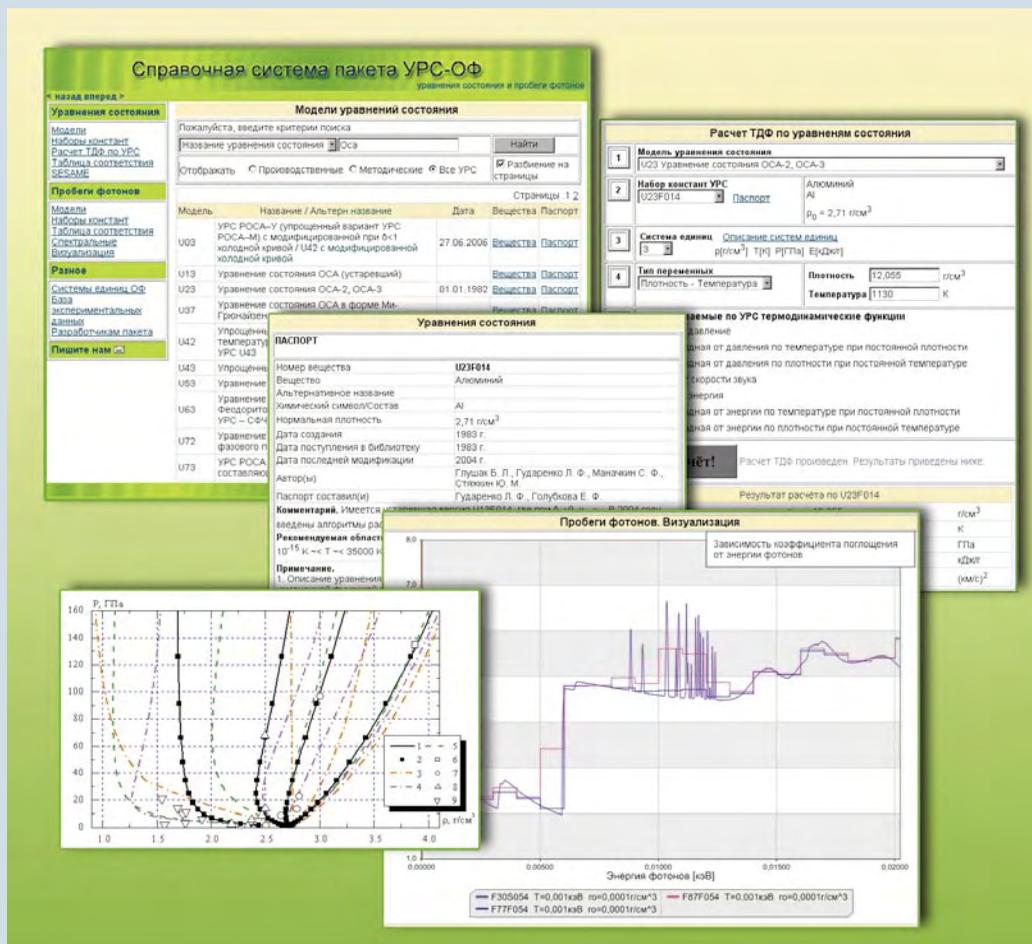
Выполнены следующие работы, направленные на усовершенствование сервиса пакета УРС-ОФ:

- Завершена работа по созданию базы данных и разработке WEB-страницы для просмотра и копирования экспериментальных данных, используемых при создании уравнений состояния. Разработаны программы визуализации для WEB-страницы базы экспериментальных данных, полученных с использованием ударных волн.

- Проведен анализ вариантов реализации единой библиотеки моделей упругопластического деформирования. Разработан проект соответствующего раз-

дела пакета УРС-ОФ. В состав библиотеки включены: модели с изотропным упрочнением, упруговязкопластические модели, релаксационные модели максвелловской вязкости, модели с дислокационной кинетикой пластического деформирования. Проведено автономное тестирование библиотеки.

- Значительно увеличен объем справочной информации для пользователя. В таблицах базы данных содержится информация о моделях уравнений состояния и сменных наборах констант к ним; моделях средних пробегах фотонов и сменных наборах констант к ним; многогрупповых и спектральных коэффициентах поглощения, полученных по программе THERMOS; моделях для расчета упругопластических свойств веществ; литературе по тематике пакета УРС-ОФ.



Пример работы с графической справочной системой пакета УРС-ОФ

Завершены важные этапы в работах по созданию единых для всех многомерных методик и программных комплексов средств графического задания начальных данных для расчетов, обработки результатов счета и созданию единых библиотек решателей:

- В рамках развития технологии подготовки начальных данных трехмерных задач в программе 3D-РНД разработаны новые алгоритмы обработки исходных геометрий, реализовано построение новых типов сеток (составных регулярных, нерегулярных методом отсечения), реализованы новые алгоритмы фильтрации и графической обработки данных, в том числе в параллельном режиме. Новые возможности позволили провести подготовку трехмерной задачи с 1 миллиардом ячеек счетной сетки. Произведена комплексная отладка взаимодействия методики КОРОНА и программы глобального пересчета сеточных величин.

- Внедрены усовершенствования в параллельный визуализатор ParaView с открытыми кодами, повышающие его масштабируемость в части чтения данных, выбора оптимальных режимов взаимодействия серверной части на визуализационном кластере с клиентской частью на рабочей станции пользователя, расширены допустимые форматы ячеек сетки и учтены свойства ячеек, содержащих смесь веществ.

- Повышена масштабируемость собственной проблемно-ориентированной (на сетки) библиотеки ЕФР (единый файл-разрез) ввода-вывода данных параллельных задач.

- В собственной библиотеке решателей разреженных линейных систем алгебраических уравнений PMLP/ParSol усовершенствованы решатели для многомерной декомпозиции, реализованы решатели для многопроцессорных узлов с об-

щей памятью, отлажена работа библиотеки на большом числе процессоров.

Работы по совершенствованию расчетно-теоретической базы, разработке новых и усовершенствованию существующих физико-математических моделей, методик и программных комплексов неотделимы от работ по совершенствованию вычислительной базы института. Поэтому, начиная с середины 90-х годов, этому уделяется особое внимание. К настоящему времени создана вычислительная база современного уровня, сосредоточенная в новом вычислительном центре РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В 2007 году проведена реконструкция ВЦ, обеспечивающая размещение высокопроизводительных вычислительных систем на площади около 3000 м², надежное электропитание и охлаждение энергоемких вычислительных установок на базе первичного электроснабжения мощностью до 9 МВт.

В начале 2007 года в РФЯЦ-ВНИИЭФ сдана в эксплуатацию разработанная специалистами института вычислительная система рекордной производительности, на которой в круглосуточном режиме осуществляются расчеты задач математической физики в двумерной и трехмерной постановках по основной тематике института и исследованию ряда физических проблем. Конструкция вычислительной системы приспособлена к эффективному выполнению задач по программным комплексам нового поколения, способным эффективно загружать большое число процессоров. В настоящее время заканчивается разработка и создание вычислительной системы еще большей производительности, которая войдет в неоднородный вычислительный комплекс (НВК) с общими для всех ЭВМ подсистемами на базе объединяющей высокоскоростной коммуникационной маги-

стриали, выходящей на подсеть из более 700 рабочих станций пользователей сотрудников ИТМФ.

В 2007 году развиты подсистемы НВК: высокопроизводительная система графической обработки результатов численного моделирования большого объема и высокоскоростная иерархическая файловая система большой емкости, обеспечивающая их долговременное хранение. Их работу можно охарактеризовать следующими цифрами: в систему долговременного хранения ежедневно перемещается более 1 терабайта данных; вычислительный кластер системы графической обработки позволил визуализировать поля рассчитанных физических величин на сетках до 1 миллиарда трехмерных ячеек.

Весь комплекс вычислительных средств объединен в аттестованную закрытую вычислительную сеть (ЗЛВС) ВЦ, которая в 2007 году также усовершенствовалась. Закончена разработка уникальной системы централизованной печати и ввода-вывода электронной информации (СЦВВИ) в/из ЗЛВС всеми пользователями; в дополнение к сегменту ЗЛВС, ориентированному на расчетные исследования, создан сопряженный сегмент для теоретических исследований.

Насущной необходимостью является возможность использования высокопроизводительного ВЦ опытно-конструкторскими подразделениями ВНИИЭФ. Для решения этой задачи увеличена производительность аттестованной территориально распределенной автоматизированной системы в защищенном исполнении (РАСЗИ) на базе криптосистем, расширено число пользователей, повышены удобства их работы. Это — часть НИР по созданию системы защищенного доступа к вычислительным ресурсам ВЦ ВНИИЭФ других предприятий.

Разработка высокопроизводительных ЭВМ, вычислительных комплексов и вычислительных сетей сопровождалась развитием в РФЯЦ-ВНИИЭФ их системного программного обеспечения. В 2007 году

- Усовершенствована подсистема мониторинга эффективности распараллеливания приложений STK при счете на многопроцессорной ЭВМ, что позитивно влияет на загрузку вычислительной системы.

- Усовершенствована единая система управления заданиями ЕСУЗ в мультикластерном вычислительном комплексе НВК, что позволяет оперативно отслеживать и управлять ходом расчета.

- Усовершенствован комплекс программ управления перемещением вырабатываемой задачей информации между параллельными файловыми системами ЭВМ и долговременным хранилищем, что повышает параллелизм обработки и создает удобные возможности уничтожения устаревших данных.

- Внедрена подсистема сетевой загрузки ОС на бездискковое вычислительное поле многопроцессорной ЭВМ, ускоряющая установку и смену системного программного обеспечения, что особенно ценно для больших вычислительных систем.

В 2007 году во ВНИИЭФ разработаны:

- масштабируемая система управления заданиями JAM в многопроцессорной ЭВМ, обеспечивающая автоматизацию массовых расчетов с учетом специфики управления счетом, особенностей структуры ЭВМ и структуры декомпозиции параллельных задач (проходит опытную эксплуатацию);

- автоматизированная система тестирования многопроцессорных систем АСТ, обеспечивающая запуск тестов прикладного уровня, сохранение результатов в базе данных и их последующую обработку, и

набор программ Noise Suit для измерения неоднородностей и нестабильностей (шума) в работе многопроцессорных ЭВМ.

В 2007 году на нескольких предприятиях Росатома, в том числе и ВНИИЭФ, внедрена разработанная во ВНИИЭФ программная система контроля и учета ядерных материалов Ascord-2005 с улучшенными свойствами. Проводятся работы по сертификации данной системы на более высокий класс защищенности с разграничением прав доступа. База данной системы позволяет адаптировать ее и к другим потребностям учета и контроля. Так, во ВНИИЭФ в 2007 году на базе этой системы разработана и усовершенствована система СФИНКС, обеспечивающая наблюдение за нарушениями режима безопасности в ЗЛВС ВЦ ВНИИЭФ.

При расчете кинетики химических или термоядерных реакций необходимо знать температуру и концентрацию реагирующих веществ, перемешанных на молекулярном или атомарном уровне. На базе вихревой подсеточной модели построена кинетика измельчения вихрей до размеров действия молекулярной диффузии. Показано, что время выравнивания температуры и концентраций в смешанных ячейках определяется временем измельчения частиц. Это позволяет создать алгоритмы усреднения концентраций, температур и уравнение состояния смеси. Таким образом, заполнено недостающее звено в це-

почке уравнений, описывающих турбулентное перемешивание с переходом в гомогенное.

Проведены тестовые расчеты с использованием вихревой подсеточной модели турбулентности по методике МЕДУЗА-П по развитию возмущений на цилиндрической границе, ускоряемой сходящейся ударной волной (обсчет опытов ИФВ на ударной трубе). Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с опытом. К сожалению, на качество экспериментов повлияла пленка, разделяющая газы, и асимметрия схождения УВ в опыте. Кроме того, проводились уточненные расчеты по обтеканию легким газом «тяжелого» угла (опыты на ударной трубе в ИФВ). Результаты расчетов близки к экспериментальным данным. На рисунке область 1 — канал ударной трубы заполнен воздухом ($\rho = 1,205 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $\gamma = 1,4$), область 2 заполнена газом фреон-12 ($\rho = 5,13 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $\gamma = 1,139$). Начальное давление в областях 1 и 2 равно 1 атм. На правой границе области 1 задано постоянное давление 2,26 атм. Размеры области 1 — 49×12 см, области 2 — 9×6 см. В опыте исследуется обтекание «тяжелого» угла — течение двух разноплотных газов с перемешиванием. Экспериментальные теневые фотографии представляют собой вид области деформирования и перемешивания газов «на просвет». В расчетах по стандартной схеме без учета перемешивания ширина перемешанной зоны не воспроизводится.

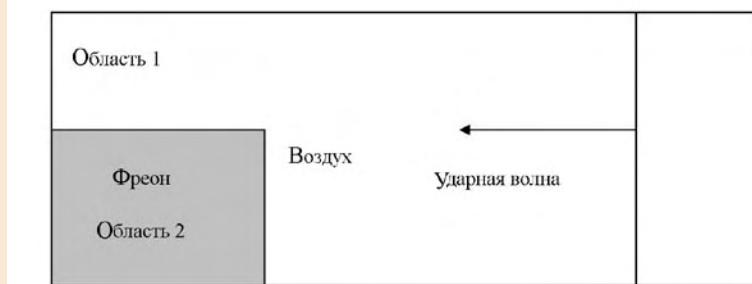
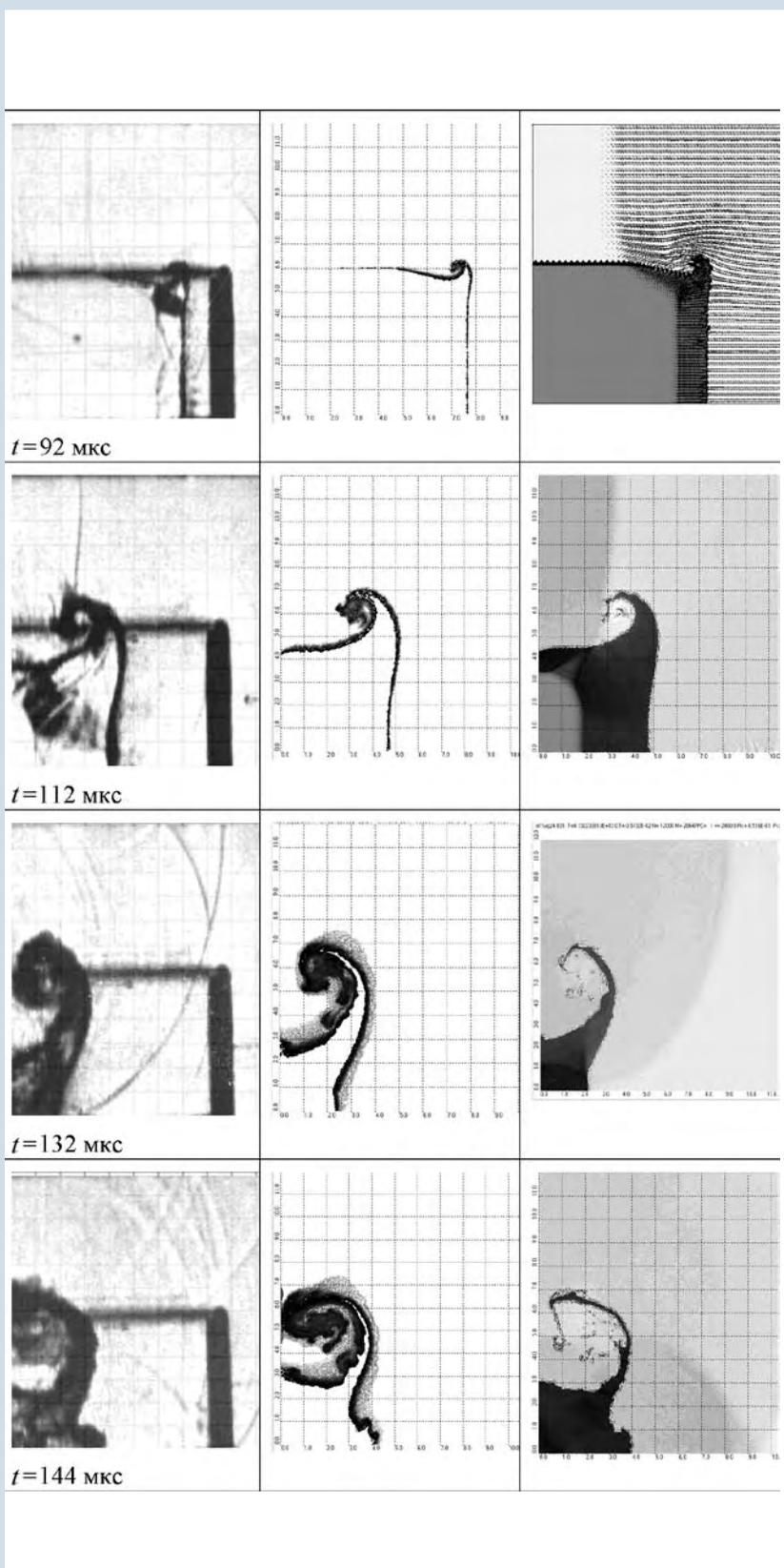


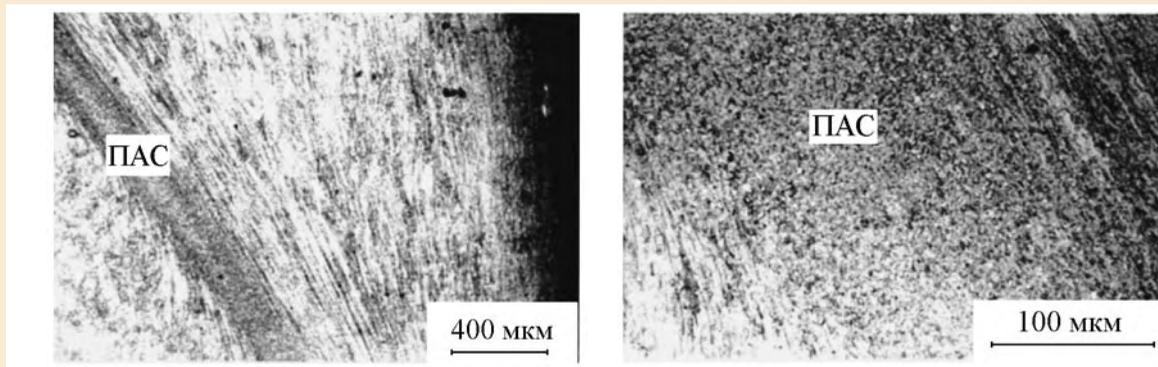
Схема эксперимента по обтеканию «тяжелого» угла



Обтекание «тяжелого» угла: слева — эксперимент; в центре — расчет по МЕДУЗЕ с моделью турбулентности (поле концентраций фреона в смеси); справа — поле плотности в расчете без турбулентности на разные моменты времени

На основании качественного анализа экспериментальных данных и аналитических оценок построена феноменологическая модель упругопластического течения и сдвигового разрушения при слабых ударах. Нагревом в ударных волнах пренебрегается. В основу модели положено очаговое представление о зарождении и росте пластичности. Течение в очагах вихревое. На это указывают современные экспериментальные данные. Источником вихревого течения являются группы плоскостей скольжения на решеточном уровне. Они же компенсируют вязкие силы. В результате картина движения очагов в твердом теле качественно близка к течению идеальной жидкости. На основании этих представлений получены простые уравнения упругопластического течения, где среда представляется в виде упругой матрицы с находящимися в ней очагами пластичности. Структура полосы адиабатического сдвига видна из рисунка. Внутри полосы видна мелкодисперсная структура, образовавшаяся в процессе вихревого движения. На краях полосы видны вытянутые структуры, соответствующие переходной зоне (вязкий подслой), в которых происходит интенсивная диссипация энергии при сдвиге. Результаты могут быть использованы в моделировании инициирования ВВ при низкоскоростном воздействии, а также для моделирования упругопластических течений инертных материалов при высоких скоростях деформирования.

Решены уравнения, в которых процесс детонации рассматривается как фазовый переход. Найден критерий отбора стационарного режима детонации как процесса с минимальным производством энтропии (теорема Гладсдорфа — Пригожина). Получено уравнение для нахождения стационарного профиля давления. Применение условия Чепмена — Жуге позво-



Полосы адиабатического сдвига (ПАС). Скорость движения вещества в канале 70 м/с

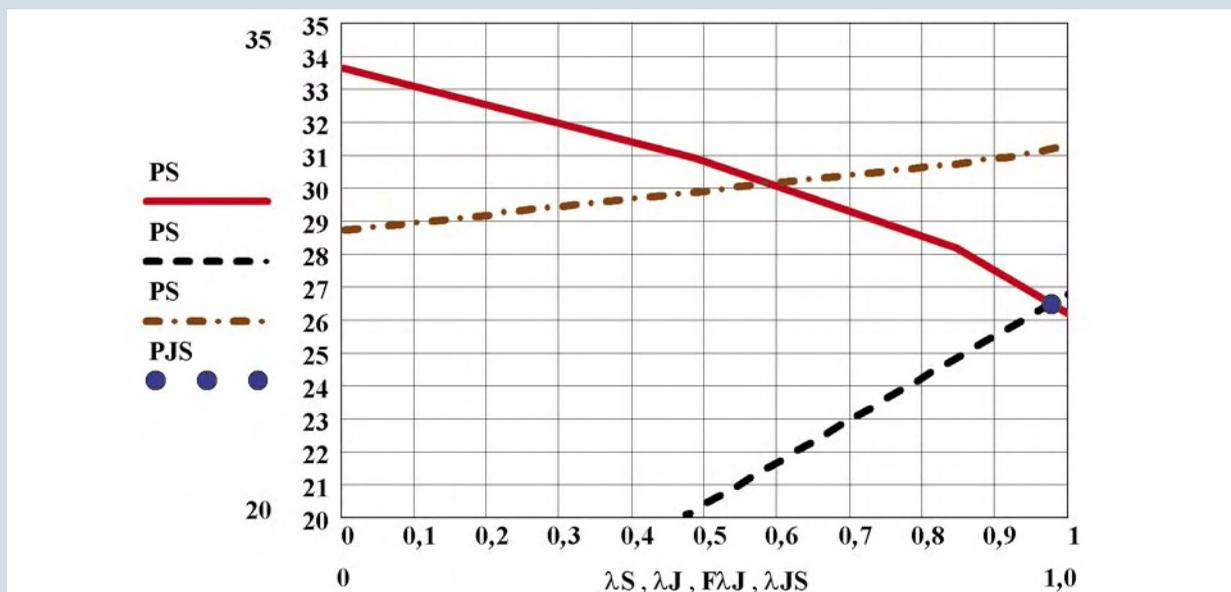
ляет определить положение на этом профиле точки Жуге в виде двух независимых параметров $\{\lambda_J, P_J\}$ — выгорания в точке Жуге и давления в этой точке. Выгорание в точке Жуге может быть меньше 1,0, тогда часть ВВ выгорает за точкой Жуге, и эта часть определяет переменную долю выделения энергии, зависящую от внешних граничных условий в эксперименте. Этот факт объясняет так называемое неидеальное поведение ВВ, одним из типичных представителей которых является ТАТБ.

С помощью методик ЭГАК и ТРЭК исследовалось развитие турбулентного перемешивания и регулярного локального возмущения (ЛВ) на границе раздела воздух-SF₆. Число Маха распространяющейся в ударной трубе волны в SF₆ от 1,7 до 9,1. Рассмотрены случаи с ЛВ различной формы: в виде треугольной «канавки» и полуцилиндра. Расчеты проводились с помощью прямого 2D и 3D численного моделирования. Получено:

— результаты 3D- и 2D-расчетов в целом близки друг к другу;

— вариация сетки в 3D-расчетах в целом не меняет решения, однако в расчете на более грубой сетке имеется более протяженная по длительности стадия, на которой заметна роль схемной вязкости. Она проявляется в регулярных возмущениях на образующей канавке. Число гармоник возмущения уменьшается со временем в согласии с теоретическими оценками;

— турбулентность в зоне перемешивания (ЗТП) затухает со временем в согласии с простыми теоретическими оценками



Стационарное решение для профиля давления $P_s(\lambda)$ (ГПа) в зависимости от выгорания λ из уравнения с минимальным производством энтропии для ВВ типа ТАТБ (красная линия). Черный пунктир — линия точек Жуге для «замороженной» скорости звука (ЗСЗ). Синяя точка — давление и выгорание в точке Жуге с ЗСЗ ($\lambda_J \sim 0,97$; $P_J \sim 26,5$ ГПа). Коричневый штрих-пунктир — решение для точек Жуге с применением «незамороженной» скорости звука ($\lambda_J \sim 0,60$; $P_J \sim 30,0$ ГПа). Реальное выгорание в точке Жуге при $\lambda_J = 0,60 - 0,97$ и давлении $P_J = 26,5 - 30,0$ ГПа

для ширины ЗТП и турбулентной скорости;

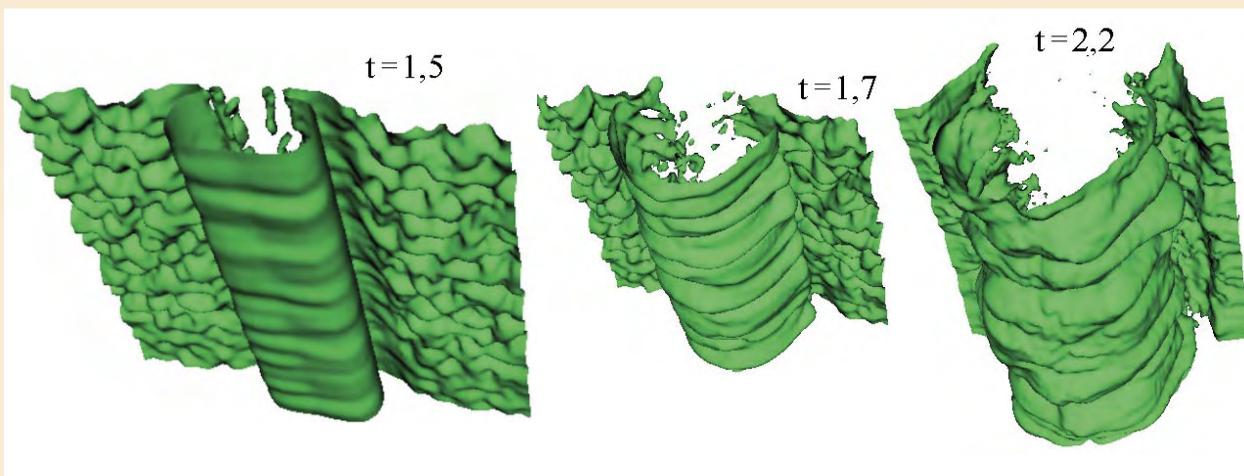
— анизотропия пульсаций скорости в ЗТП уменьшается со временем, оставаясь значительной;

— при несущественных количественных отличиях в целом согласие расчетов для четырех опытов с экспериментальными диаграммами достаточно удовлетворительное. В расчетах, как и в опытах, при малом числе Маха ширина ЗТП становится малой по сравнению с протяженностью ЛВ, а оно мало по сравнению с расстоянием до фронта ударной волны;

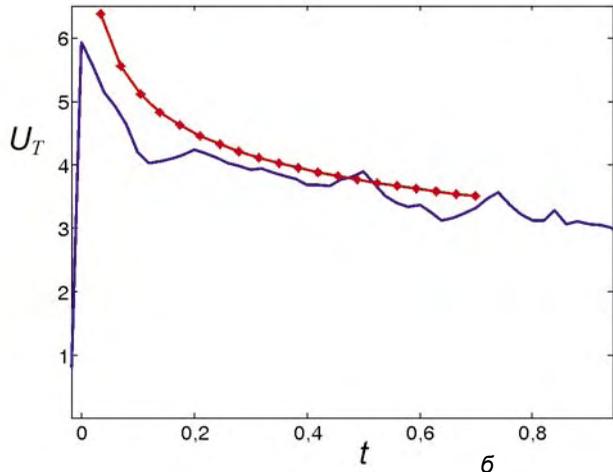
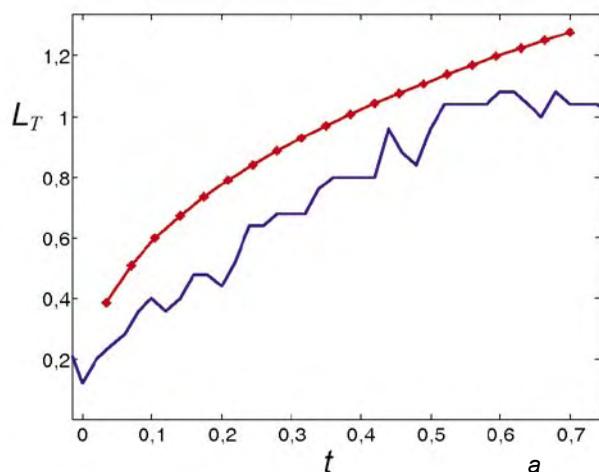
ударной волны при ее движении по SF_6 . При числе $M_{yB} = 2,6 - 2,7$ указанные значения сравнимы, а при $M_{yB} = 6,1$ передние кромки ЗТП и ЛВ практически сливаются с фронтом ударной волны. Сказанное относится к конкретной постановке опыта. Если протяженность области SF_6 сделать достаточно большой, ширина ЗТП и протяженность ЛВ будут стремиться к нулю по сравнению с расстоянием до фронта ударной волны;

— картины развития ЛВ и ЗТП в целом близки для обоих видов начального ЛВ.

Как известно, система МАГО работает в два этапа. Вначале с помощью спирального ВМГ в плазменной камере происходит замагничивание и нагрев плазмы до температуры $\sim 0,3 - 0,5$ кэВ. На втором этапе плазма сжимается оболочкой, разгоняемой с помощью более мощного дискового ВМГ. Для уменьшения вредного влияния примесей в Д-Т-плазме необходимо, чтобы поверхность стенок камеры была покрыта веществом, состоящим из легких химических элементов. Расчеты показали, что бериллиевое покрытие стенок камеры МАГО



Изоповерхности концентрации SF_6 в 3D-расчете с ЛВ типа «канавка»



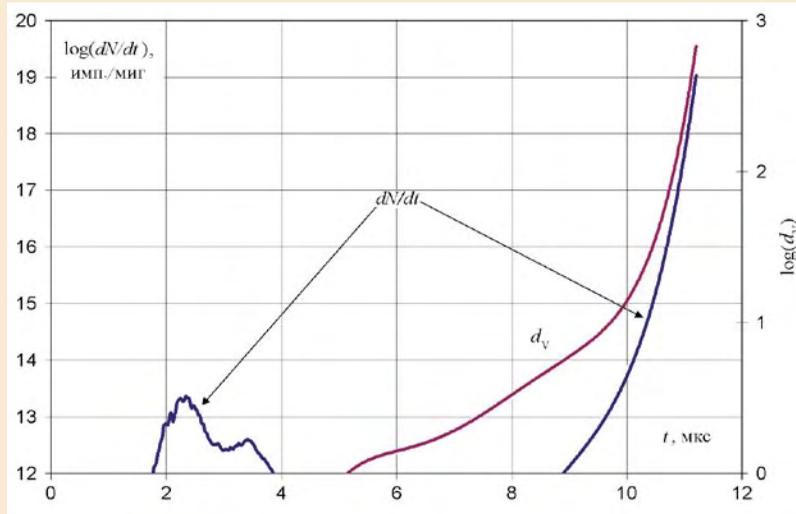
Зависимости от времени ширины ЗТП (а); турбулентной скорости (б):

— 2D-расчет; — теоретическая оценка

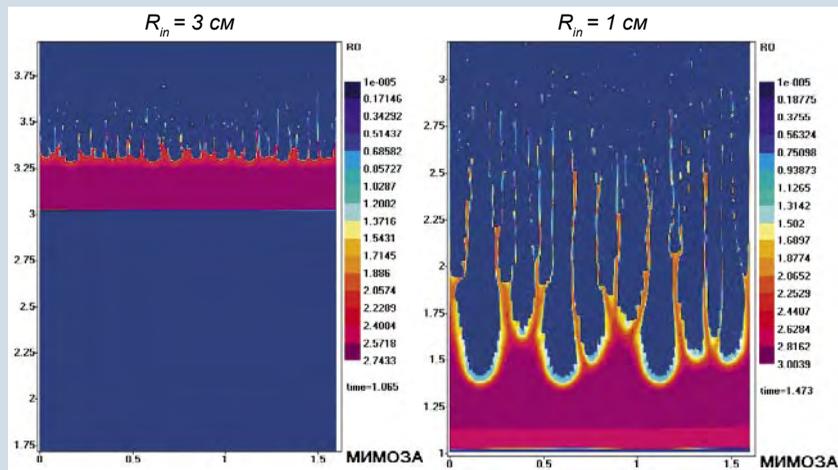
позволяет снизить потери энергии, связанные с наличием примесей, и увеличить время жизни плазмы до ~ 10 мкс. Появляется возможность существенного увеличения нейтронного выхода (до $\sim 10^{18} - 10^{19}$) при объемном сжатии плазмы $\sim 10^3$, что соответствует критерию Лоусона — термоядерная энергия порядка тепловой энергии Д-Т-плазмы.

В научных и прикладных исследованиях различных процессов при высоких плотностях энергии во многих случаях используются лайнеры, разгоняемые до высоких скоростей. Важной характеристикой лайнеров, используемой в приложениях, является ровная форма внутренней поверхности при сохранении лайнера в конденсированном состоянии. Двумерные расчеты показывают, что при разгоне лайнеров с помощью спирального ВМГ до скоростей ~ 8 км/с, несмотря на сильное искажение наружной поверхности лайнера из-за развития рэлей-тейлоровской неустойчивости, внутренняя поверхность может оставаться достаточно ровной. Такие лайнеры можно использовать в различных приложениях (исследование динамической прочности, уравнений состояния веществ и т. д.).

Продолжено развитие программного комплекса ЛОГОС-2 для расчета задач тепломассо-переноса и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС). В комплексе ЛОГОС-2 реализована возможность проведения сопряженного анализа характеристик газодинамических установок, каналов сложной формы и летательных аппаратов с учетом взаимного влияния двух процессов. С одной стороны, поверхности каналов и обтекаемых тел подвержены воздействию давления движущегося газа, что может привести к их существенной деформации. С другой стороны, деформация поверхностей, ограничивающих течение жидкости или газа, неизбежно вызывает изменение картины самого тече-



Зависимость интенсивности нейтронного выхода (dN/dt) от времени в 2D-расчете для камеры с бериллиевым покрытием на стадии предварительного нагрева (слева) и сжатия со скоростью ~ 10 км/с (справа), d_v — объемное сжатие, начало сжатия — 5 мкс



Изолинии плотности Al лайнера, разгоняемого с помощью токов спирального ВМГ ~ 19 МА, полученные в расчете на моменты времени, соответствующие положениям внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 3$ и 1 см (начальный радиус 4 см)

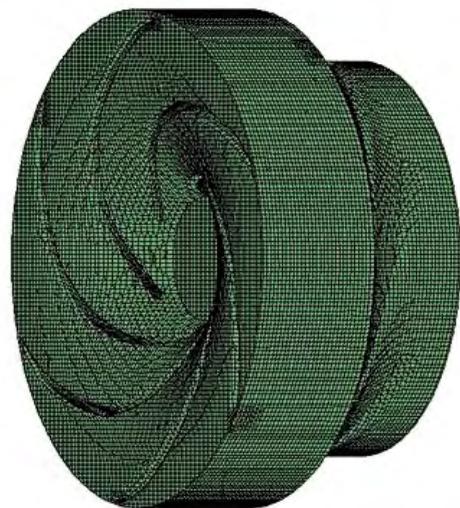
ния. Связь между программами газодинамики и анализа НДС обеспечивается специализированным модулем, который выполняет обмен граничными условиями и морфинг (деформацию) расчетной сетки. Работоспособность модуля продемонстрирована на примере сквозных расчетов задач аэроупругости в квазистатическом приближении.

Усовершенствован ряд алгоритмов и модулей комплекса:

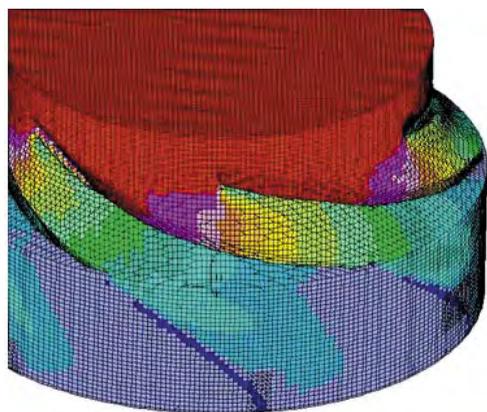
- Разработан и внедрен метод решения уравнений Навье — Стокса на сетках, состоящих из многогранников с произвольным числом граней.

- В модуль газодинамики добавлена возможность учета эффектов сжимаемости в околозвуковых и трансзвуковых течениях.

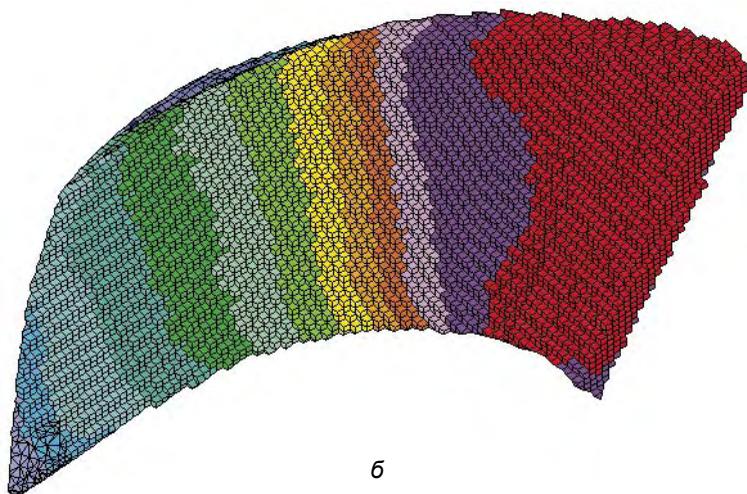
- В модуль анализа НДС введен учет температурного нагружения.



Расчетная сетка в области рабочего колеса насоса



а



б

Поле давления в области рабочего колеса насоса (а)
и на поверхности лопатки рабочего колеса (б)

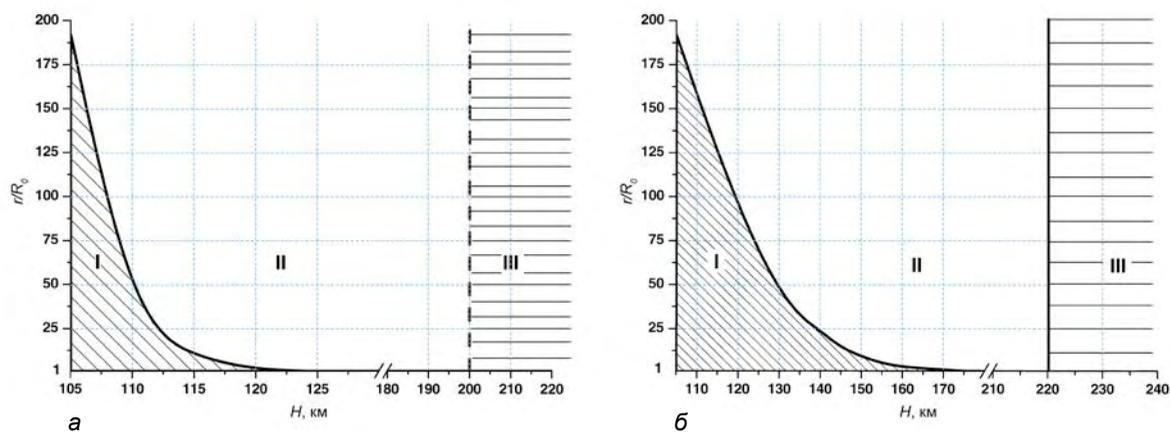
В 1962 году на высоте 400 км (над островом Джонстон в Тихом океане) американцы произвели ядерный взрыв мощностью 1400 кт (операция «Starfish»). В публикациях, описывающих этот взрыв, сообщалось, что в северной магнитосопряженной области в момент времени $t \approx 60$ мс зарегистрировано значительное увеличение тока электронов и этот результат трактовался как приход в данную область потока фотоэлектронов, возникших в атмосфере при поглощении в ней рентгеновского излучения ядерного взрыва.

Вопрос о возможности и условиях ухода фотоэлектронов на расстояния, заметно большие, чем характерные размеры области их образования, интересен как с прикладной, так и с чисто научной точки зрения (физика верхней атмосферы), однако для его решения требуется самосогласованное рассмотрение трехмерной задачи о движении фотоэлектронов, электронов проводимости и возникающих электромагнитных полях. В ИТМФ рассмотрены некоторые качественные закономерности решения данной задачи. Цель работы состояла в том, чтобы ответить на вопросы: каковы условия ухода фотоэлектронов; как зависит доля уходящих фотоэлектронов от параметров задачи (высота, мощность взрыва, проводимость ионосферы). Для решения задачи был использован ряд упрощений, основные из них следующие. Для определения достаточного условия «запирания» фотоэлектронов решалась аналитически самосогласованная задача об одномерном движении фотоэлектронов в ионосфере при условии малого, по сравнению с начальной, изменения плотности фотоэлектронов. Эти условия могут реализоваться на достаточно малых расстояниях от источника. Для описания траекторий фотоэлектронов, ожидающихся на больших расстояниях от точки рождения, влиянием электроста-

тического поля на их движение пренебрегалось. Считалось, что фотоэлектроны движутся вдоль силовых линий геомагнитного поля. В обоих случаях движение фотоэлектронов считалось бесстолкновительным. Показано, что возможность фотоэлектронам уйти из области ядерного взрыва зависит от скорости света, проводимости ионосферы,

начальной скорости фотоэлектронов, координаты точки рождения фотоэлектрона, радиуса полной ионизации воздуха выходящим рентгеновским излучением, частоты Ленгмюра в области полной ионизации $r \leq R_0$. На рисунках приведены некоторые результаты расчетов для параметров рентгеновского излучения, которые реализовались в

операции «Starfish». В области I фотоэлектроны «запираются» и покинуть ее не могут; из области III уйдут все фотоэлектроны; из области II может уйти только часть электронов. Как видно из рисунков, все фотоэлектроны могут покинуть область ядерного взрыва при взрыве на высоте $H > 200$ км (дневное время) и $H > 220$ км (ночное время).



Характерные области задачи: а — дневное время вблизи максимума цикла солнечных пятен; б — ночное время вблизи минимума цикла солнечных пятен; H — высота точки взрыва; r — координата точки рождения фотоэлектрона, R_0 — радиус полной ионизации воздуха выходящим рентгеновским излучением

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Введен в эксплуатацию рентгенографический комплекс РГК-Б, состоящий из трех рентгеновских установок нового поколения БИМ234.3000 и многоканальной многокадровой электронной системы регистрации рентгеновского изображения субмикросекундного диапазона. Новый комплекс позволит регистрировать быстротекущие процессы в трех направлениях. Это даст возможность математическими методами воссоздать трехмерную картину объекта исследования в разные моменты времени. Комплекс расширит возможности исследователей и позволит им решать практически весь спектр задач, поставленных перед газодинамикой.



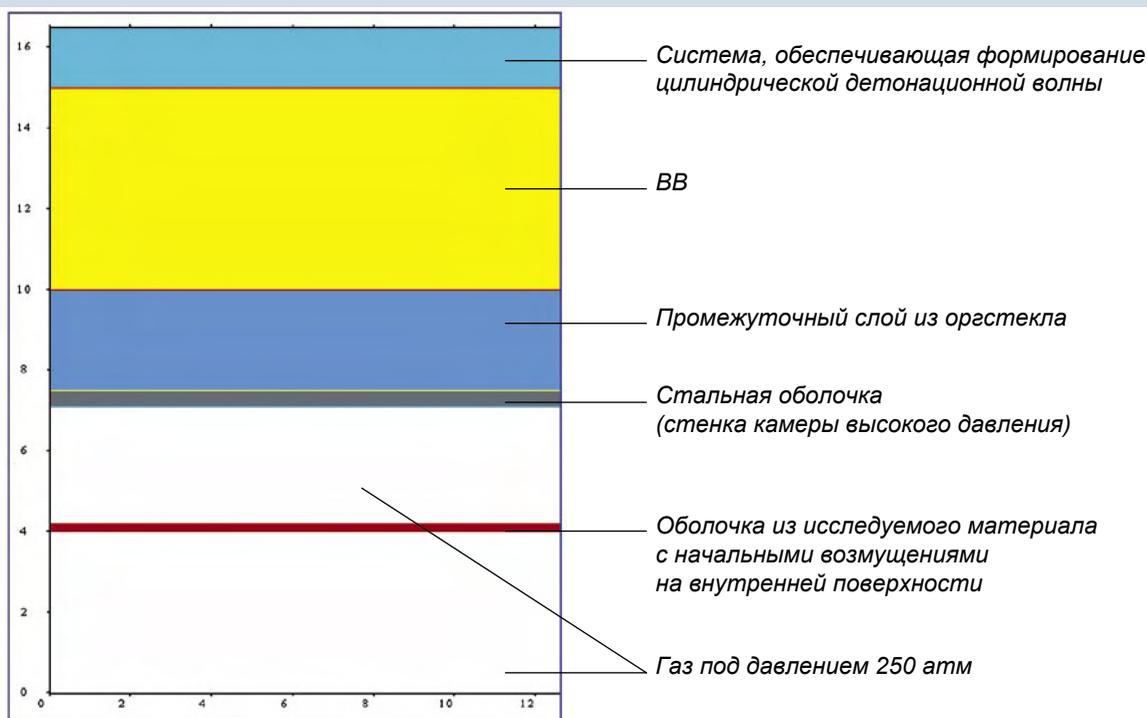
Рентгенографический комплекс РГК-Б. Центральный зал с тремя рентгеновскими установками БИМ234.3000

Методом возмущений проведено исследование прочности природного урана в диапазоне давлений до 6 Мбар. В опытах регистрировался рост возмущений на поверхности сжимаемой цилиндрической оболочки с помощью импульсной рентгенографии. Уровень давления, при котором получены данные о сдвиговой прочности урана, на сегодняшний день является «мировым рекордом». После детонации ВВ происходит

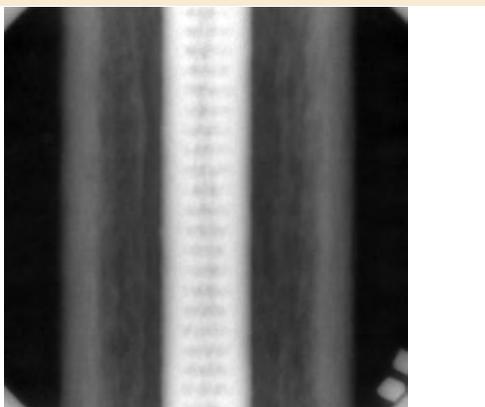
осесимметричное схождение оболочек. В сжимающемся газе растет давление, что с некоторого момента приводит к торможению и последующему разлету оболочек. После начала торможения происходит рост амплитуды возмущений на внутренней поверхности оболочки из исследуемого вещества. Интенсивность этого роста определяется в том числе и прочностью материала в данных условиях. В эксперименте

фиксируется положение границ оболочек и амплитуда возмущений в различные моменты времени. Полученные данные используются для верификации моделей прочности и определения сдвигового напряжения.

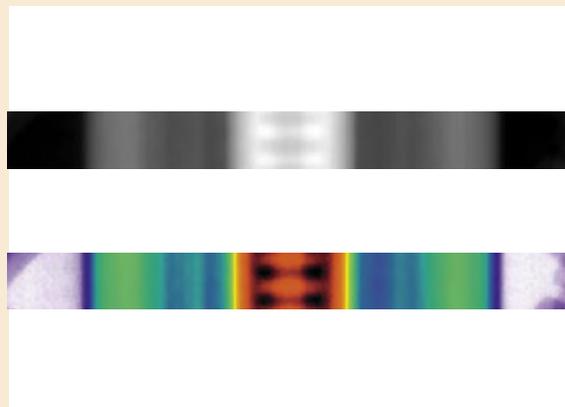
Анализ эксперимента показал, что максимальное сдвиговое напряжение при давлении 6 Мбар достигает ≈ 300 кбар, что в 600 раз выше, чем при нормальных условиях.



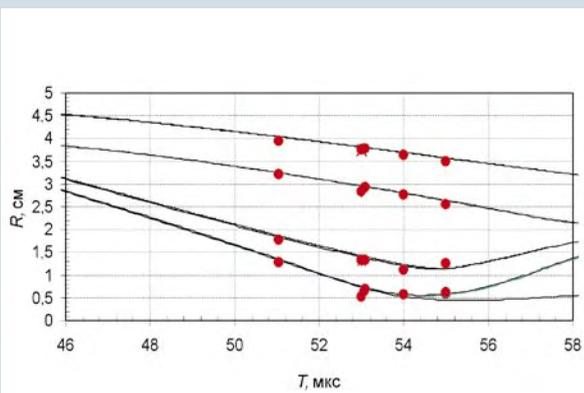
Принципиальная схема экспериментального устройства для исследования прочности



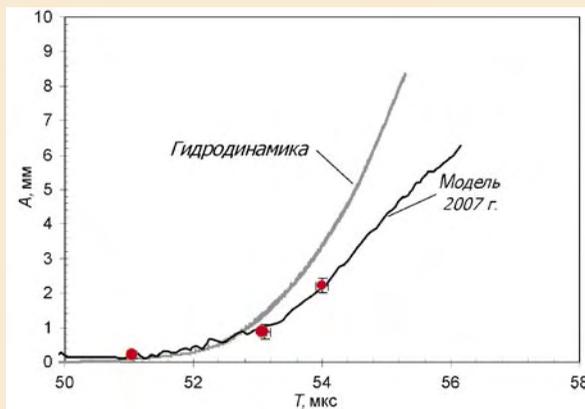
Типичный рентгено снимок оболочек экспериментального устройства с развившимися возмущениями большой амплитуды



Результат математической обработки участка рентгено снимка для трассировки границ и определения амплитуды возмущений в опыте



Движение границ оболочек экспериментального устройства (линии — расчет, точки — эксперимент)



Рост амплитуды возмущений на внутренней границе оболочки исследуемого вещества. Гидродинамика — расчет без учета прочности материала оболочки; модель 2007 г. — расчет с использованием современной модели поведения вещества

Внедрена методика исследования взрывных процессов с помощью радиоинтерферометра миллиметрового диапазона. Методика позволяет проводить непрерывную регистрацию динамики ударных и детонационных волн в ВВ. С помощью

данной методики проведены исследования зависимости глубины возбуждения стационарной детонации от давления инициирования в составах на основе октогена и ТАТБ. На X-t-диаграмме отчетливо виден излом, соответствующий

моменту возбуждения стационарной детонации в образце. В эксперименте с составом на основе ТАТБ глубина возбуждения детонации составила 5,54 мм при давлении инициирования 14 ГПа, а скорость детонации — 7490 м/с.

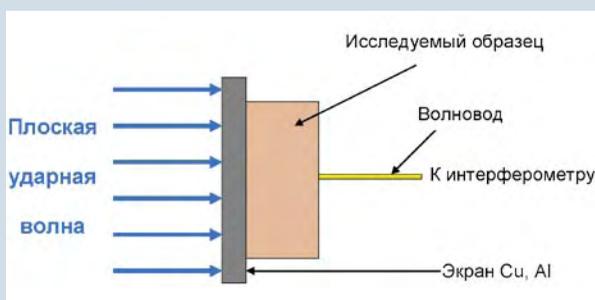
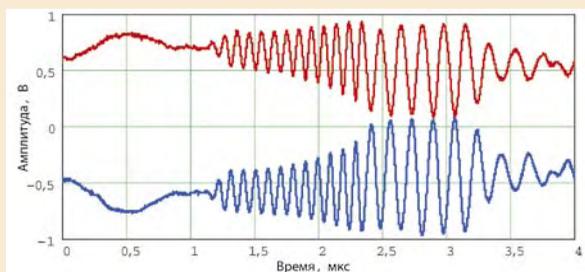
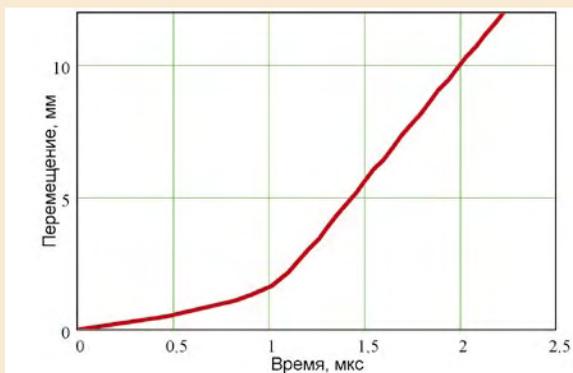


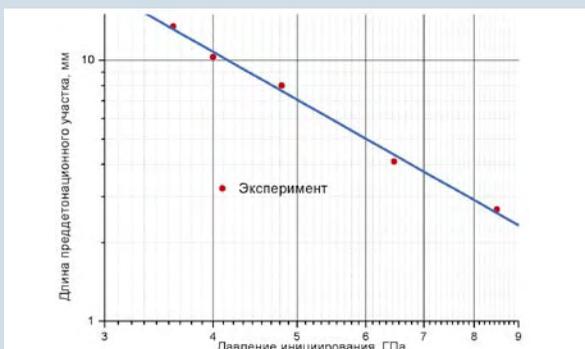
Схема проведения экспериментов



Типичные интерферограммы процесса распространения детонации



Типичная X-t-диаграмма процесса распространения нормальной детонации



Зависимость глубины возбуждения детонации от давления инициирования для состава на основе октогена (скорость детонации 8830 м/с)

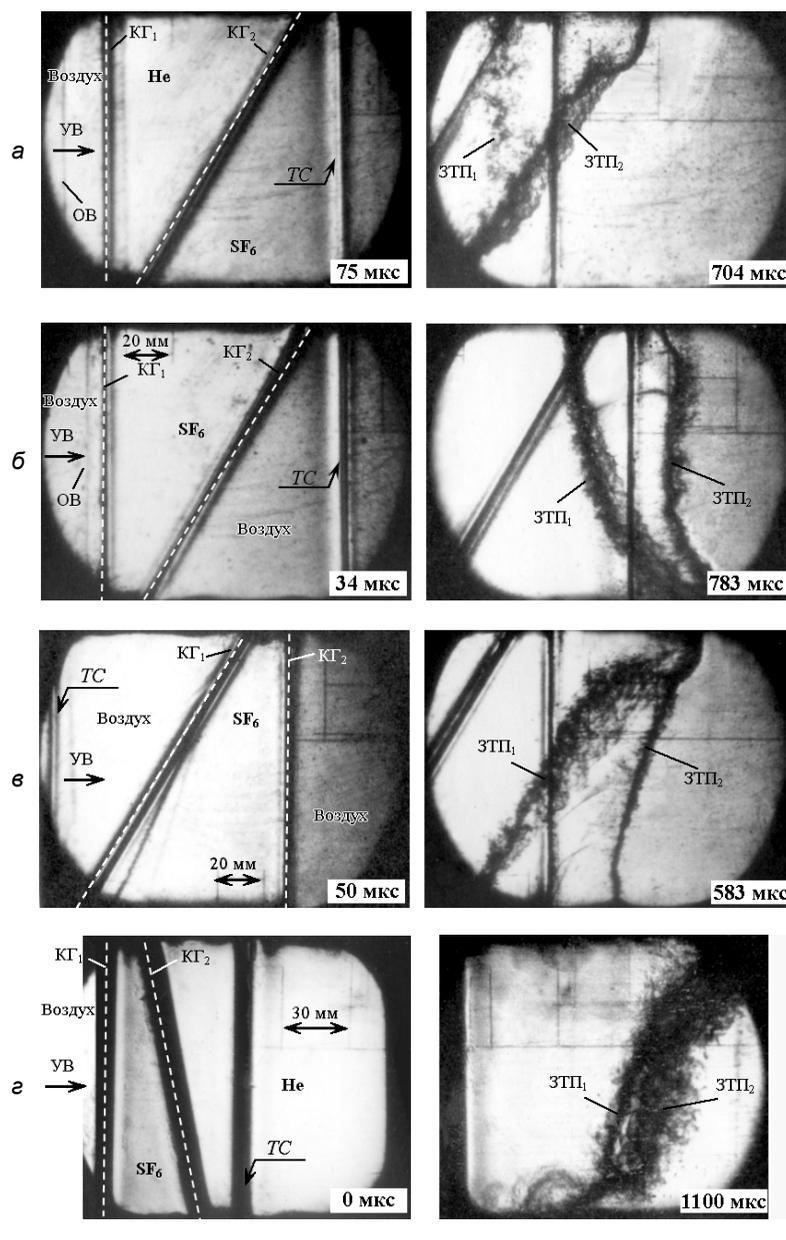
Исследовано развитие турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах с наклонной контактной границей. Регистрировалось развитие перемешивания на контактных границах газовых слоев воздух- He-SF_6 , воздух- SF_6 -воздух, воздух- SF_6 -He. Число Маха падающей ударной волны составляло 1,3. Газы изначально разделялись тонкой (1 мкм) полимерной

пленкой, которая под действием ударной волны разрушалась.

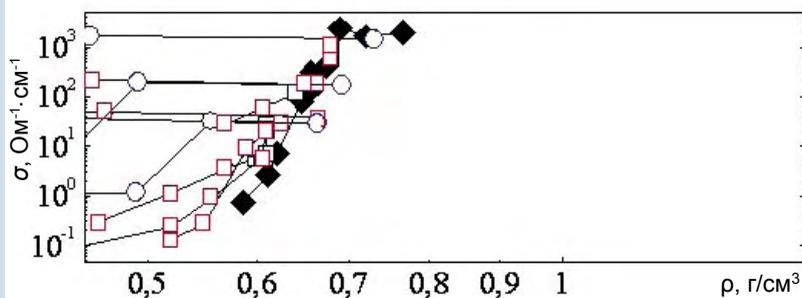
В каждой серии опытов одна из контактных границ газов располагалась параллельно фронту падающей ударной волны, другая — под определенным углом, что приводило к возникновению двумерного течения со сложным характером перемешивания газов на этих границах.

Полученные данные будут использованы для тестирования численных методов расчета неустойчивых гидродинамических течений.

Завершено исследование квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия в двух каскадных цилиндрических устройствах. Исследуемая в опытах область состояний дейтерия лежит в интервале давлений от ~ 70 до ~ 500 ГПа и температур от ~ 3000 до ~ 5000 К. Эксперименты с устройствами цилиндрической геометрии выполнены на экспериментальном полигоне с помощью двух независимо работающих бетатронов, оси которых расположены под углом 135° друг к другу. В серии последовательных экспериментов определяли $R(t)$ -диаграмму движения оболочки и радиус в момент максимального сжатия газа (момент «остановки»). Плотность дейтерия между экспериментальными точками при давлениях 127 и 140 ГПа возрастает на $\sim 25\%$. Не исключено, что выявленный скачок плотности является экспериментальным доказательством фазового перехода нового типа в сильно неидеальной плазме дейтерия с сильным кулоновским взаимодействием частиц, а не обычным переходом «газ-жидкость» или плавлением молекулярного кристалла. Обнаруженный переход подтверждает резкий рост электропроводности водорода (на пять порядков) в области плотностей $0,6 - 0,7$ г/см³ в экспериментах, в которых водород сжимался серией последовательных ударных волн. Анализ данных показывает, что рост проводимости неидеальной плазмы водорода связан с ионизацией давлением. При переходе к дейтерию зафиксированный рост электропроводности соответствует плотностям $1,2 - 1,4$ г/см³, что согласуется со скачком плотности квазиизэнтропически сжатого дейтерия.



Развитие перемешивания в слоеке воздух- He-SF_6 (а); воздух- SF_6 -воздух (б); воздух- SF_6 -воздух (в); воздух- SF_6 -He (г). ОВ — отраженная волна; КГ₁, КГ₂ — контактные границы газов; ЗТП₁, ЗТП₂ — зоны турбулентного перемешивания на КГ₁ и КГ₂; ТС — технологический стык



Зависимость электрической проводимости от плотности:
 ◆ — данные ИГХФ для жидкого водорода;
 ○, □ — данные LLNL для газообразного дейтерия

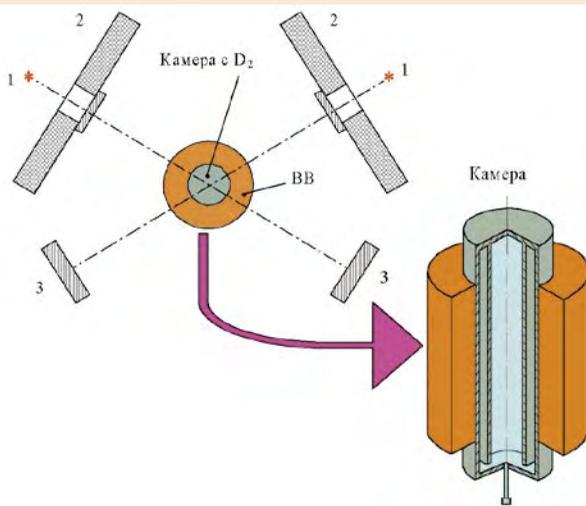
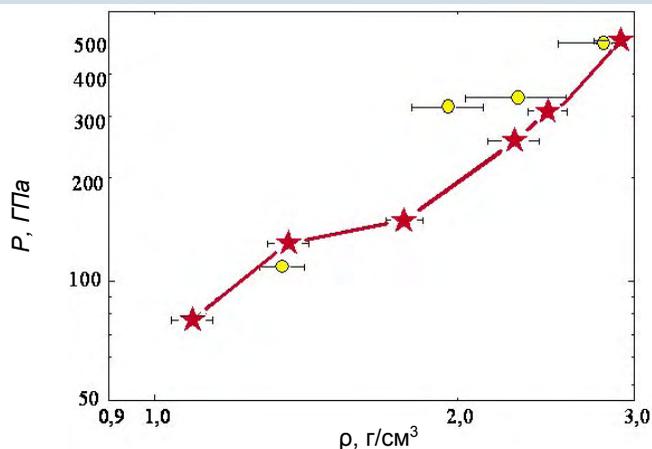
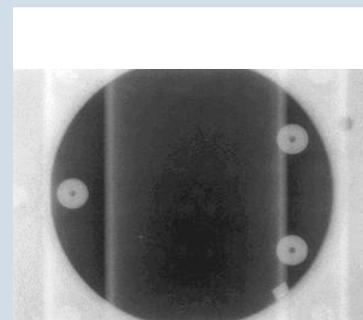


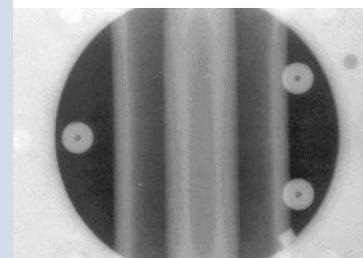
Схема эксперимента по измерению сжимаемости газообразного дейтерия в цилиндрической камере: 1 — источники γ -излучения; 2 — казематы; 3 — регистратор



Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия:
 ● — данные С. Б. Кормера и др.; ★ — новые данные



а



б

Рентгенограммы оболочек в экспериментальном устройстве с массой ВВ 16 кг в исходном состоянии (а) и в момент максимального сжатия дейтерия (б)

Разработан новый метод исследования деформирования, компактирования и гетерогенного течения металлов на микро- и мезомасштабных уровнях при скорости деформации $10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$, основная идея которого состоит в том, что в исследуемом образце заранее создаются цилиндрические отверстия (поры) размером $d < 1 \text{ мм}$. Достижимые в эксперименте параметры деформации $\epsilon_i \sim 30 - 150 \%$; скорости деформации $\dot{\epsilon}_i \sim 10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$. При таких параметрах в меди происходит переход к гетерогенному характеру течения на двух масштабных уровнях (100 и 10 мкм).

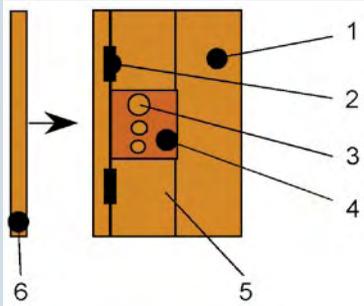
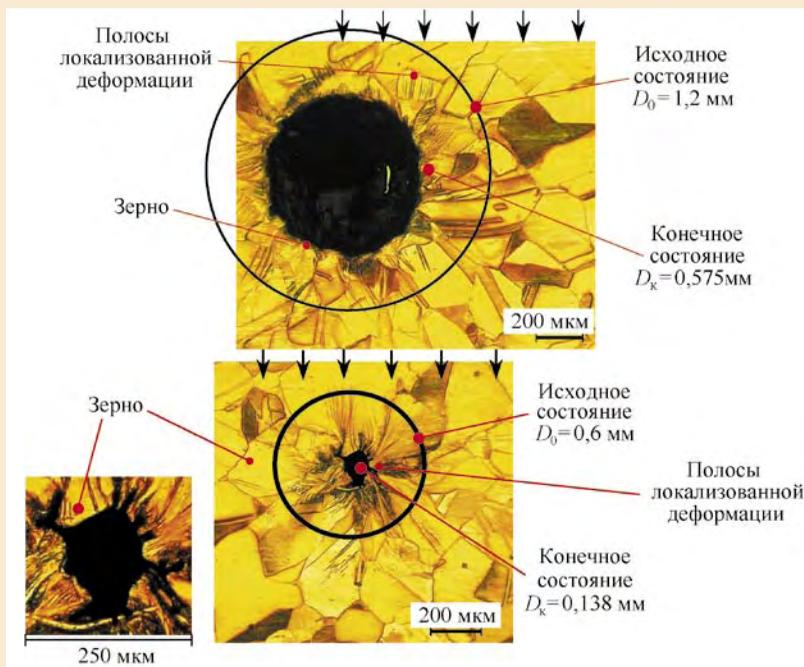
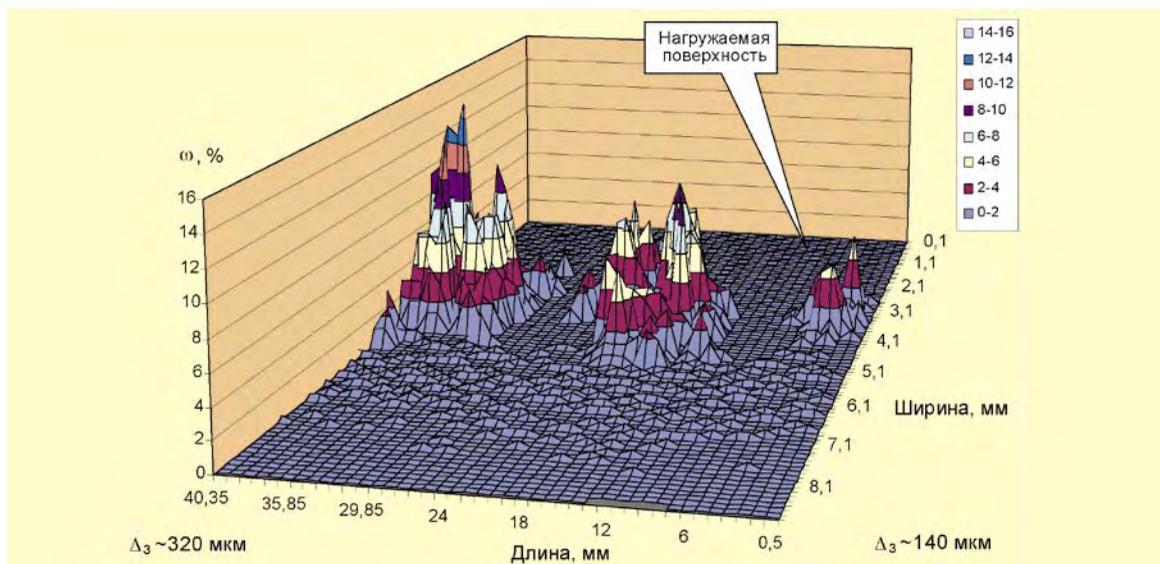
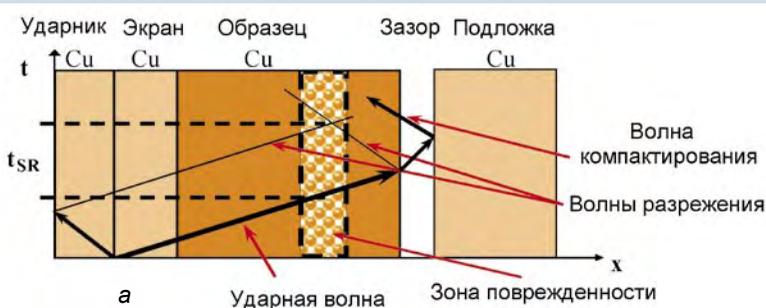


Схема нагружения: $\sigma_x = 1,6$ ГПа; $t = 1$ мкс: 1 — подложка; 2 — датчики; 3 — пора; 4 — сохраняемый образец; 5 — обойма; 6 — ударник

Обнаружена зонная структура распределения поврежденности в образце меди после прохождения по нему интенсивных волн сжатия и разрежения. Распределение поврежденности имеет характер скопления пор с характерным размером 0,5 – 1 мм. На диаграмме показано распределение поврежденности в образце в зависимости от размера зазора ($\Delta_3 \sim 320 - 140$ мкм). Такой характер распределения не имеет в настоящее время теоретического объяснения.



Состояние пор до и после нагружения



б

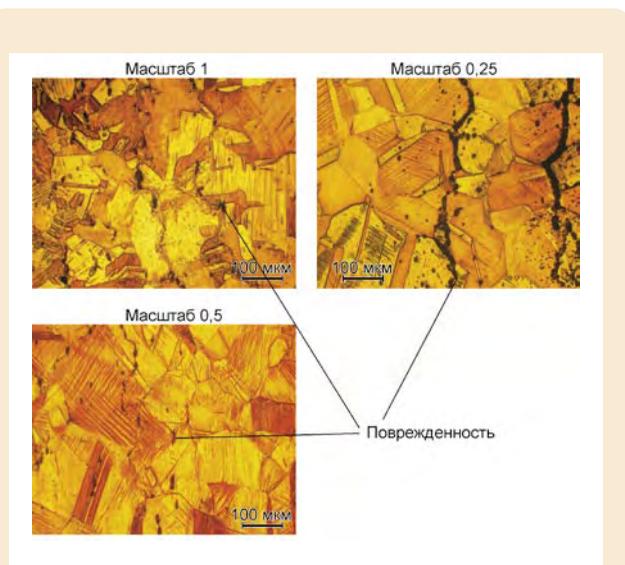
Схема эксперимента (а) и диаграмма распределения поврежденности по образцу (б)

Обнаружено нарушение масштабного эффекта при откольном разрушении. В исследуемых образцах уменьшался интервал времени между моментом прохождения ударной волны и началом разрушения t_{SR} за счет изменения масштаба эксперимента в два и четыре раза. Интенсивность нагружения во всех экспериментах сохранялась на уровне ~ 35 ГПа. Сохраненные после опытов образцы разрезались и измерялась поврежденность. Зарегистрировано увеличение поврежденности при уменьшении масштаба, хотя существующие в настоящее время модели разрушения предсказывают обратный

эффект. Возможной причиной этого эффекта является образование перегретых полос локализованной деформации после воздействия ударных волн.

Проведены исследования влияния скорости соударения на эффективность множественного удара. Установлено, что более глубокое проникание в твердые мишени группы ударников по сравнению с одиночным ударником происходит при

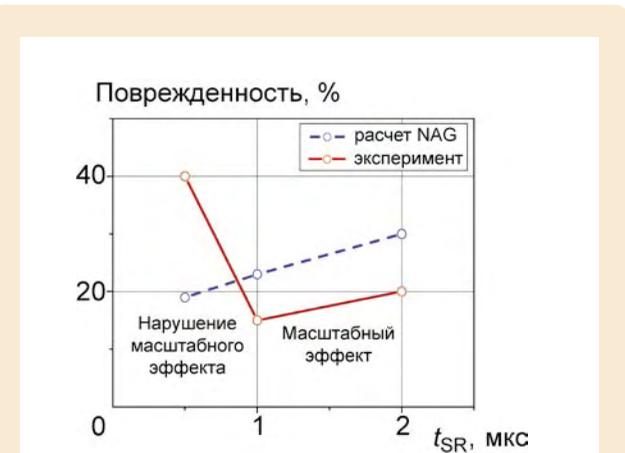
скоростях U , приблизительно равных или больших пороговой скорости U_n . Глубины проникания при одиночном ($z_{од}$) и множественном ($z_{мн}$) ударах возрастают приблизительно по степенному закону $z \propto U^{1/3}$, причем в диапазоне скорости соударений 840–2100 м/с имеет место систематическое превышение глубин проникания при множественном ударе: $(z_{мн}/z_{од})_{exp} = 1,2 - 1,6$.



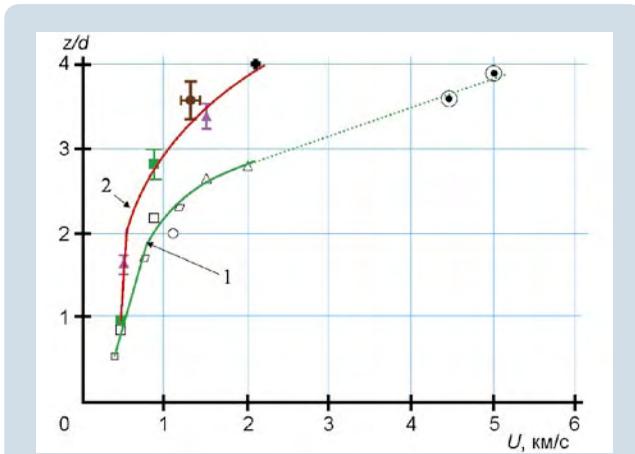
Микроструктура образцов после эксперимента



Мишени после опыта: а — титан ВТ-20, сферические ударники $\varnothing 5$ мм; б — алюминий Д16, цилиндрические ударники $\varnothing 5 \times 5$ мм. Ударники из стали ШХ15, скорость соударения $U = 900$ м/с



Зависимость поврежденности от времени прихода откольного импульса



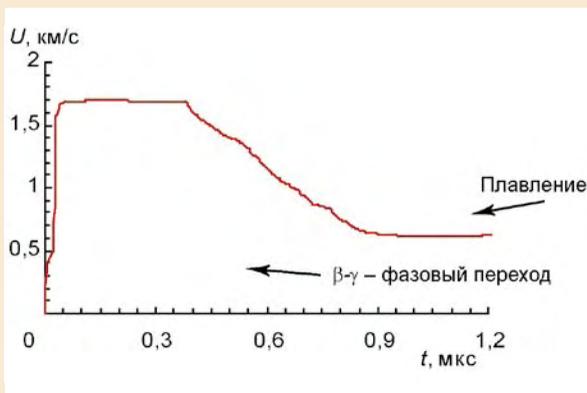
Зависимость относительной глубины проникания от скорости при одиночном (1) и множественном (2) соударениях стальных шариков с мишенями из алюминиевых сплавов

С помощью лазерного интерферометра в олове зарегистрированы β - γ -фазовый переход при $P = 8,8$ ГПа и переход в жидкое состояние (плавление) на волне разгрузки при $P = 9,75$ ГПа. Данный метод может быть использован для регистрации фазовых переходов, в том числе

плавления в других металлах.

Разработан и испытан взрывной резак для наружной резки опор морской платформы с наружным диаметром трубы 762 мм и толщиной стенки до 51 мм. Взрывной резак должен надежно функционировать в водной среде на глубине погружения до 300 м.

В конструкции резака применен метод ударных волн разрежения. Резак состоит из шести фрагментов с ВВ, которые коаксиально с помощью пневматического привода охватывают трубу. При подрыве ВВ массой не более 6 кг происходит разделение трубы в месте реза.



Интерферограмма опыта и профиль массовой скорости олова



Макет взрывного резака в исходном состоянии

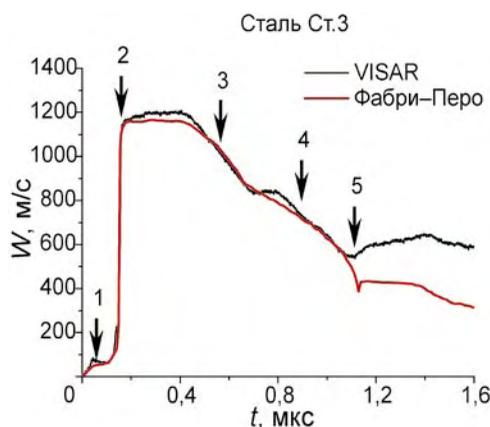
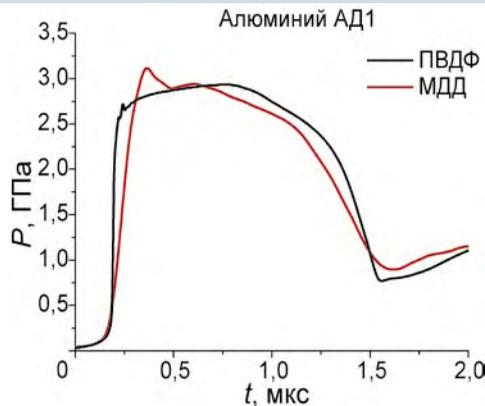
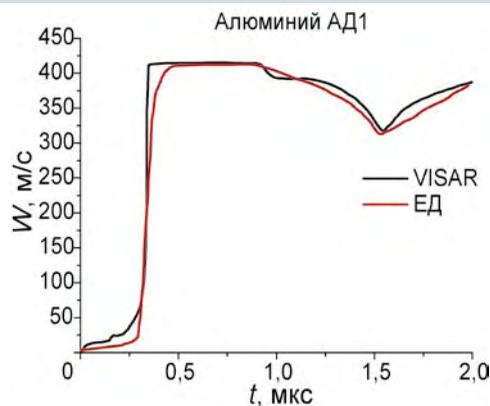


Фрагменты трубы до опыта и после реза

Проведены сравнительные исследования разрешающей способности и точности регистрации профилей ударных волн и волн разрежения в средах, испытывающих упругопластические и фазовые переходы, с помощью манганино-

вого (МДД), емкостного (ЕД), поливинилиденфторидного (ПВДФ) датчиков и лазерных интерферометров, работающих по схеме VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) и Фабри—Перо. Показано, что с помощью арсенала

методик ИФВ можно регистрировать с наносекундным разрешением параметры упругих волн разрежения, позволяющих определять динамическую прочность конструкционных материалов в диапазоне давлений 0,5–50 ГПа.



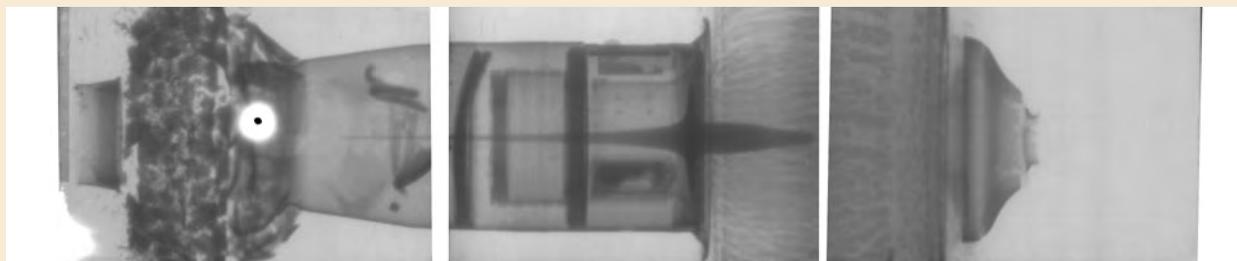
Зависимость скорости границы от времени:

- 1 — упругий предвестник;
- 2 — пластическая ударная волна;
- 3 — упругая разгрузка;
- 4 — пластическая разгрузка;
- 5 — откольный импульс

Специалистами ИЯРФ и ИФВ разработан комплекс РГК-М. Основу комплекса составляет импульсная рентгеновская установка «Страус-Р», формирующая рентгеновский импульс с энергией квантов 3 МэВ и длительностью до 50 нс. Экспозиционная доза в импульсе составляет 10–20 Р/м.

Установка «Страус-Р» позволяет просвечивать стальные конструкции толщиной до 200 мм, регистрировать взрывные процессы в изделиях со стальными корпусами, определять характеристики осколочных полей площадью до 30 м².

Рентгенографирование боеприпаса (см. рисунок) проведено на расстоянии ~20 м от источника на момент завершения работы лидирующего заряда, когда в его зону входит кумулятивная струя основного модуля.



Рентгенограмма испытания tandemного кумулятивного боеприпаса (погрешность 0,1 мкс)

Разработана взрывозащитная камера для исследования взрывных газодинамических процессов. Камера способна выдерживать взрывы мощностью 1,35 кг ТЭ.

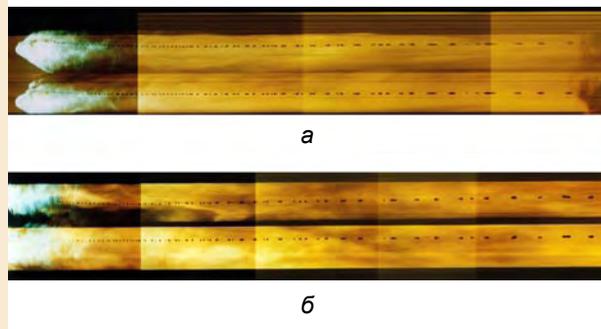
Разработан способ двойной ортогональной синхробаллистической фоторегистрации пора-

жающих элементов. Применение лазерного источника, зеркального отражателя и более совершенного перископного устройства позволило существенно повысить точность позиционирования изделий в измерительной системе. Способ позволяет в одном экспе-

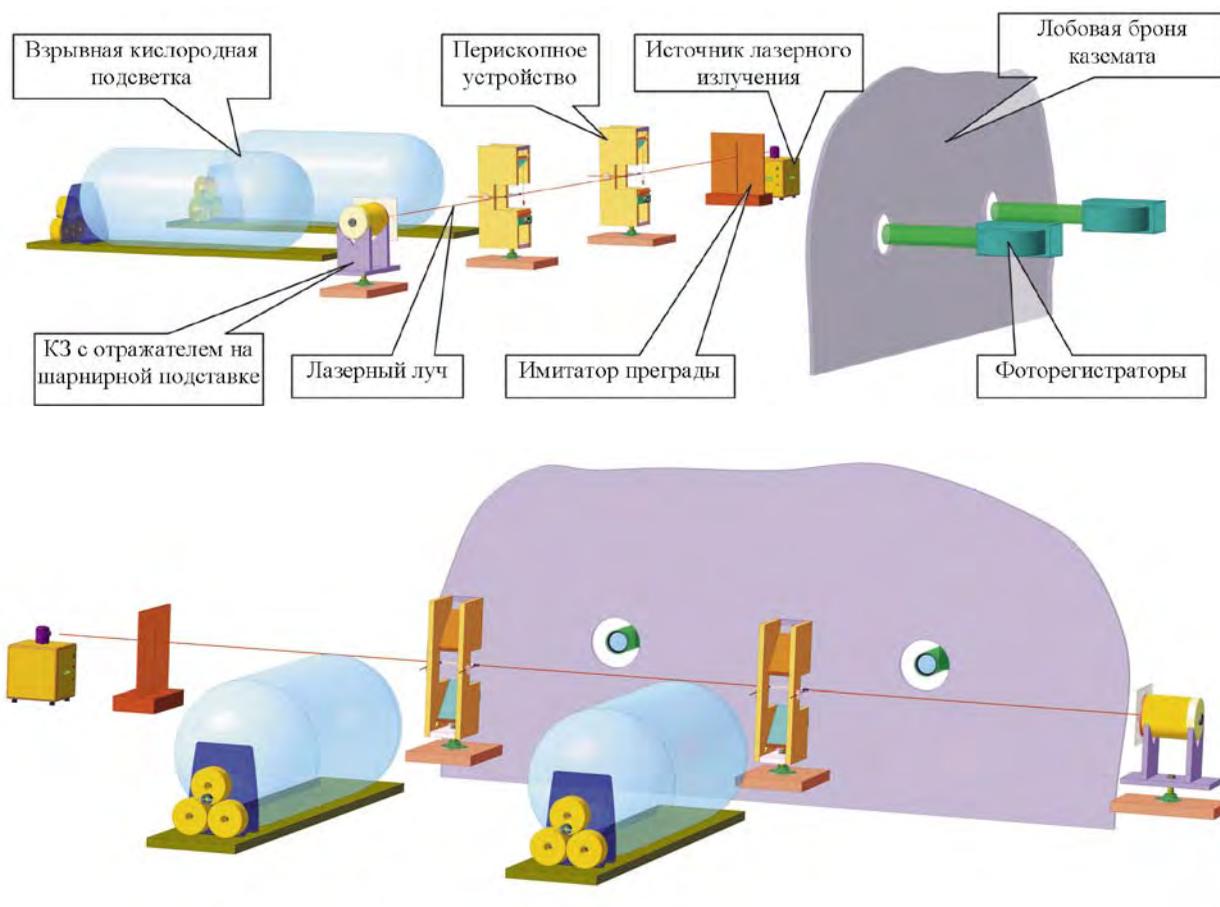
рименте успешно регистрировать как малые (несколько десятков м/с) скорости радиального смещения, так и существенно большие (10 км/с и более) осевые скорости поражающих элементов (например фрагментов кумулятивной струи).



Камера после испытания взрывом мощностью 1,35 кг ТЭ



Фотохронограмма кумулятивной струи: а — база регистрации 3,28 м; б — 4,65 м

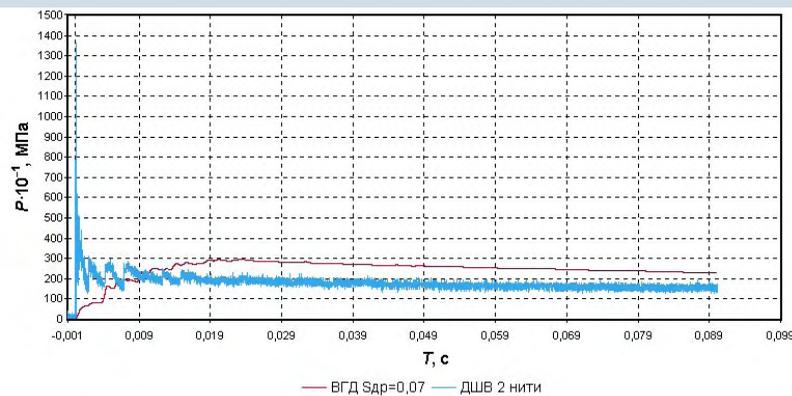


Фоторегистрация поражающих элементов

Разработана новая методика раскалывания крупных образцов блочного камня с минимальной трещиноватостью и минимальным количеством осколков. Особенностью применения взрывного генератора давления (ВГД) в данном случае является то, что подрыв заряда ВВ производится в камере, расположенной на поверхности, а в шпур поступают продукты взрыва под высоким давлением. В этом случае на горную породу действует сглаженное давление продуктов взрыва. Отсутствует бризантное воздействие взрыва, характерное для распространенного метода отбойки с помощью детонирующего шнура (ДШ), приводящее к образованию микротрещин в обрабатываемой породе. Проведены испытания работы ВГД на промышленном гранитном карьере ЗАО ПО «Возрождение» недалеко от г. Выборга Ленинградской обл. Устройство защищено патентом RU 54094.



Взрывной генератор давления



Сравнительная диаграмма развития давления в шпуре при работе ВГД и подрыве двух нитей ДШ



Кинограмма процесса раскалывания

В рамках договора с НПО «Сатурн» с использованием стенда «Ствол» проведены исследования работы вентилятора авиационного двигателя в условиях больших ускорений, возникающих при аварийных ситуациях. В частности, исследовано ударное воздействие фрагмента одной из лопаток двигателя при аварийном отрыве.

Создан переносной вариант лазерного интерферометра Майкельсона (система VISAR), адаптированного к условиям взрывных экспериментов. Трансляция лазерного излучения от исследуемого объекта до интерферометра осуществляется по длинным линиям из оптического волокна. Работоспособность

интерферометра проверена в условиях взрывных экспериментов. Созданный комплекс позволяет проводить исследования ударно-волновых процессов в материалах на современном уровне с высоким временным и амплитудным разрешением характеристик быстропротекающих процессов.



Установка «Ствол-410ПБ»



Модель лопатки после опыта

Полученные результаты позволили существенно изменить представления заказчика о характере деформации и разрушения лопаток вентилятора авиадвигателя в аварийных условиях.

Разработана электропушка, способная разгонять тонкие диэлектрические ударники до нескольких километров в секунду, используя энергию электровзрыва тонкой металлической фольги. Пушка предназначена для исследования материалов при коротком ударно-волновом воздействии — динамической прочности, скорости звука за ударным фронтом, проверки модельных представлений о физике ударного сжатия и физике релаксационных процессов в твердых телах.

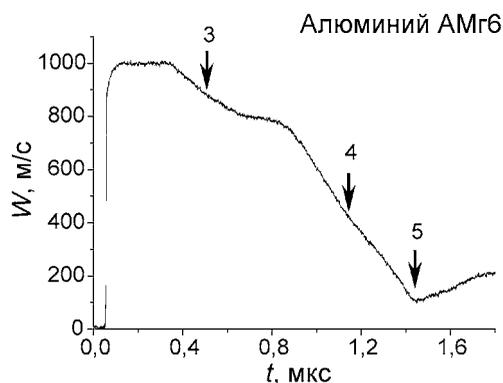
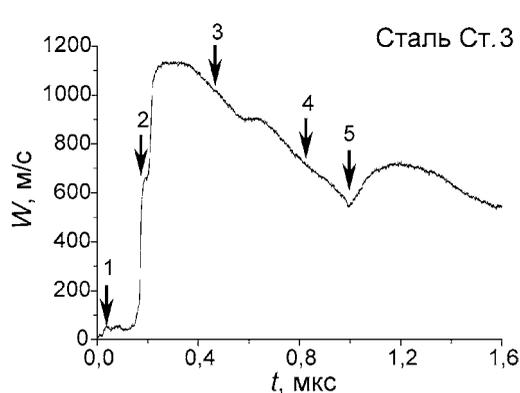
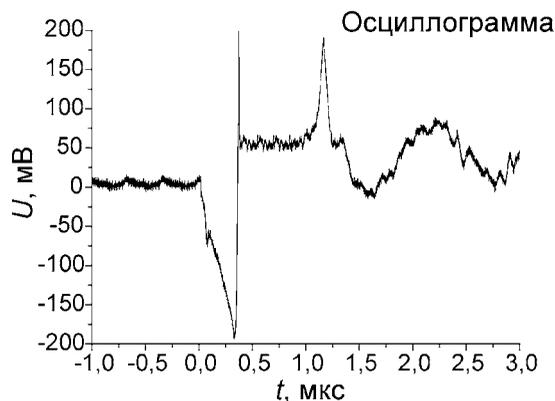
Достигнуты скорости метания: 2,7 км/с для ударника из оргстекла толщиной 1 мм и боковыми размерами 30 × 120 мм; 6 км/с для ударника из лавсана толщиной 0,15 мм и боковыми размерами 30 × 120 мм.

Параметры электропушки

Запасенная электрическая энергия	46 кДж
Частота собственных колебаний	100 кГц
Максимальная амплитуда тока в режиме короткого замыкания	10 ⁶ А



Электропушка



Осциллограмма и профили скорости контактной границы, зарегистрированные в опытах с алюминием АМг6 и сталью (Ст. 3):

- 1 — упругий предвестник; 2 — фазовый переход;
3 — упругая разгрузка; 4 — пластическая разгрузка;
5 — откольный импульс

Создан многофункциональный аппаратный комплекс АКМ-03 для многоканальной регистрации временных характеристик быстротекущих процессов с помощью оптических, контактных и генераторных датчиков, выдающих сигнал под действием ударной волны. Комплекс применяется в основных методиках при газодинамической отработке и испытании спецузлов.

В комплекс АКМ-03 входят:
— измерительный модуль с системой микроклимата;
— входные преобразователи для оптического сигнала ОЭП (ЛУЗА) и сигнала с контактных датчиков МЭФИС;
— управляющий модуль.
Измерительный канал построен на базе плат LA-64F (Лаборатория автоматизированных систем и управления, г. Москва), работающих по принципу логи-

ческого анализатора. Управляющий модуль по линии «витая пара» может на расстоянии до 1 км управлять режимами работы измерительного модуля. Комплекс зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 29458-05 и допущен к применению в Российской Федерации.

Создан многоканальный измерительный комплекс АКМ03-КСК, предназначенный для мониторинга состояния корпусов взрывозащитных камер (ВЗК), подвергнутых взрывному нагружению при испытаниях газодинамических узлов. По результатам мониторинга выносится заключение об экологической безопасности испытаний изделий в ВЗК. В состав АКМ03-КСК входят управляющий модуль, измерительный модуль и многоканальное устройство согласования с датчиками физических величин. Обмен информацией между управляющим и измерительными модулями, удаленными на расстояние до 1000 метров, осуществляется по линиям Ethernet. Для комплекса разработано программное обеспечение для регистрации аналоговых сигналов, записи данных в файл и визуализации сигналов в графическом виде.

Основные характеристики АКМ-03

Частота дискретизации	100 МГц
Количество измерительных каналов	576
Требуемый уровень оптической мощности на входе ($\lambda = 0,6 - 0,9$ мкм)	≥ 30 мкВт
Объем оперативной памяти измерительного канала	64 кслов

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

ИЯРФ активно участвует в международных программах по разработке линейных ускорителей для генерации интенсивных пучков электронов и протонов.

В соответствии с принятой на период с 2008 по 2011 год стратегией модернизации ускорителей в CERN планируется построить линейный ускоритель Н-ионов – Linac-4 как начальную низкоэнергетичную часть ускорителя SPL. Основу ускоряющей системы ускорителя Н-ионов образуют трубки дрейфа. Во ВНИИЭФ в тесном сотрудничестве с ИТЭФ создана трубка дрейфа с квадрупольной фокусирующей линзой на постоянных SmCo_5 магнитах. По сравнению с электромагнитами постоянные магниты имеют меньшую массу, в них отсутствуют токоведущие части. Параметры трубки с пролетной апертурой $\varnothing 20$ мм: эффективный градиент поля 51,5 Тл/м, среднеквадратичное отклонение магнитной оси менее 30 мкм и герметичность подтверждены испытаниями в CERN. Трубка на постоянных магнитах составит основу ускоряющей секции типа Alvarez в ускорителе Н-ионов.

В настоящее время в мире остро стоят вопросы предотвращения террористических актов и связанного с ним усиления контроля за нераспространением делящихся материалов (ДМ). В коллаборации с сотрудниками ЛАНЛ (США) в ИЯРФ

разработан транспортабельный линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2 для исследований по дистанционному обнаружению ДМ, перевозимых в закрытых транспортных контейнерах. ЛУ-8-2 можно использовать совместно с ^3He детекторами (ЛАНЛ) для обнаружения несанкционированных вложений за преградами большой толщины. Метод основан на регистрации запаздывающих нейтронов деления, образующихся в ядерных материалах при воздействии на них квантов тормозного излучения с энергией выше порога деления.

жужения несанкционированных вложений за преградами большой толщины. Метод основан на регистрации запаздывающих нейтронов деления, образующихся в ядерных материалах при воздействии на них квантов тормозного излучения с энергией выше порога деления.

Параметры ЛУ-8-2

Средняя энергия ускоренных электронов	$8 \pm 0,5$ МэВ
Средняя мощность пучка электронов	1,5 кВт
Длительность импульса тока	1–6 мкс
Частота следования импульсов тока	50–800 Гц



Излучающий модуль ускорителя, собранного на транспортировочной платформе



Трубка дрейфа

ЛУ-8-2 изготовлен, смонтирован и успешно прошел «горячие» испытания на проектном уровне СВЧ-мощности.

В CERN завершается подготовка к запуску большого адронного коллайдера (БАК) — глобального научного проекта конца XX и начала XXI века, в котором задействованы свыше 400 физических институтов и промышленность всех развитых в научно-техническом отношении стран. БАК — это ускоритель, в котором при столкновении двух пучков выделяется энергия, в миллионы раз большая, чем в единичном акте термоядерного синтеза, и уникальные детектирующие системы, благодаря которым физики смогут проникнуть так глубоко внутрь материи, как никогда ранее. ИЯРФ создает один из детекторов — фотонный спектрометр PHOS для детектирующей системы ALICE (A Large Ion Collider Experiment). В 2007 году

в плане разработки программного обеспечения системы управления и сбора данных спектрометра PHOS:

- на базе программных продуктов PVSS и CERN JCOP Framework разработана система медленного контроля спектрометра (DCS);

- проведены работы по интеграции системы медленного контроля детектора PHOS в DCS систему эксперимента ALICE;

Для запуска и тестирования системы охлаждения спектрометра PHOS:

- проведен анализ алгоритмов работы компрессоров холодильной машины, разработано программное обеспечение верхнего уровня системы контроля и управления холодильным агрегатом и гидромодулем системы охлаждения;

- проведены тестовые испытания системы охлаждения

с рабочим теплоносителем и ее подключение к модулю 1 с целью достижения в матрице кристаллов модуля температуры -25°C .

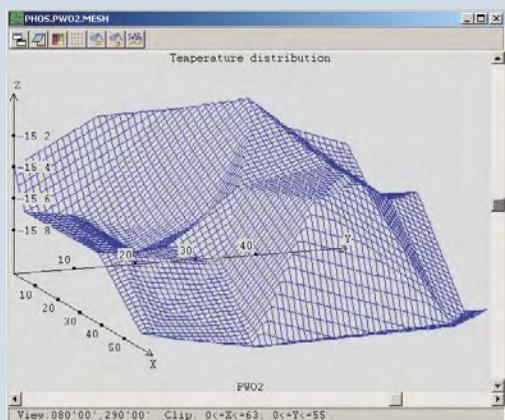
Обеспечен непрерывный режим работы модуля 1 в течение 4,5 месяца при рабочей температуре в матрице кристаллов -20°C во время его калибровки на космических лучах.

Для сборочно-монтажных работ модулей 2 и 3:

- в ЦЕРН доставлены механические структуры модулей, изготовленные в ИЯРФ;

- произведена контрольная сборка элементов механической структуры модулей, силовые элементы конструкции испытаны на механическую прочность, трубопроводы системы охлаждения — на герметичность;

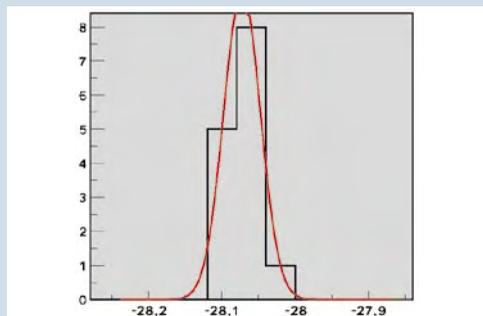
- ведется поэлементная сборка и тестирование каналов детектирования.



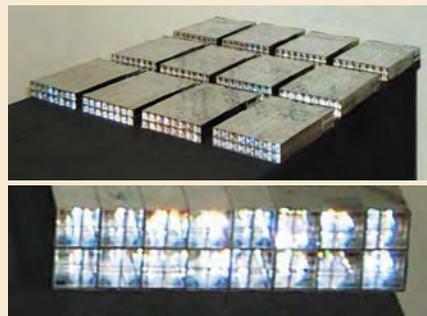
3D-распределение температуры в матрице кристаллов модуля



Каналы детектирования со стороны пучка регистрируемых частиц



Температурное поле в матрице кристаллов вдоль поверхности одного датчика температуры



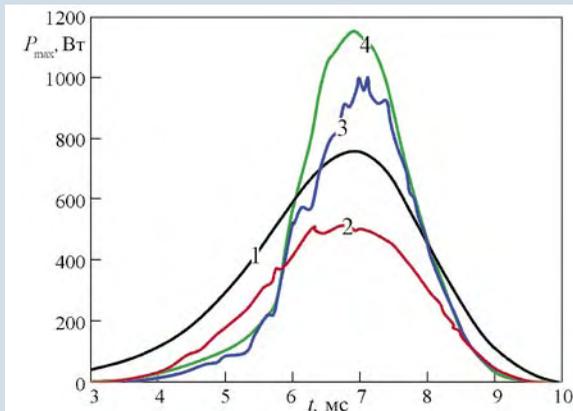
Собранные на базе кристаллов вольфрамата свинца каналы детектирования

В течение ряда лет в ИЯРФ ведутся расчетные и экспериментальные работы по проблеме сложения излучения многоканального реактора-лазера в единый световой луч высокого оптического качества. Исследования в 2007 г. проводились на лазерных установках ЛМ-8 и ЛУНА-2М, работающих совместно с реакторами БИГР и ВИР-2М. В экспериментах на модуле ЛМ-8 получена низкопороговая генерация на двух одинарных, а также двух и четырех последовательно объединенных лазерных каналах. Эффектив-

ность генерации на длине волны 1,73 мкм для смеси Ne-Ag-Xe (200:200:1) составила 0,7 %. На лазерной установке ЛУНА-2М получены близкие к предельным значениям энергия и мощность генерации двух последовательно и двух параллельно объединенных лазерных каналов.

Разработана установка для синтеза металлосодержащих соединений фуллера C_{60} (литиевый имплантер). Совместно с Институтом металлоорганической химии РАН им. Г. А. Разуваева синтезированы образцы экзо- и эндометаллофуллеренов,

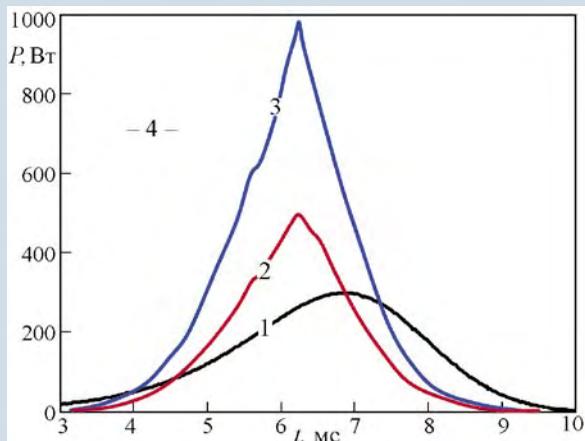
германий- и железосодержащие нанотрубки. Наноматериалы (углеродные наноструктуры) и нанотехнологии (молекулярное наслаивание, технология разработана в Санкт-Петербургском государственном техническом университете) использованы для получения объемно и поверхностно модифицированных полимеров с повышенными радиационными, механическими и термическими характеристиками для применения в изделиях, требующих высокой стойкости и безопасности в условиях длительной эксплуатации.



Последовательное объединение двух лазерных каналов на установке ЛУНА-2М: импульс реактора ВИР-2М (1); одинерный лазерный канал (2); двойной канал (3); расчетная мощность генерации двойного канала для коэффициента отражения поворотных зеркал 100 % (4)



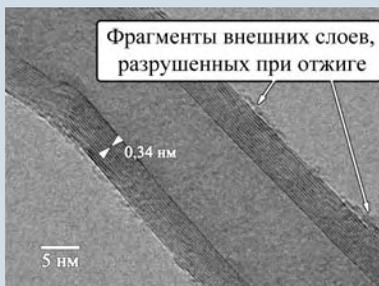
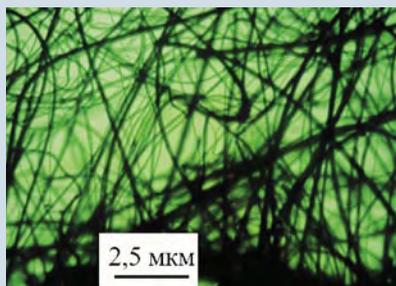
Имплантер



Параллельное объединение двух лазерных каналов на установке ЛУНА-2М: импульс реактора ВИР-2М (1); одинерный лазерный канал (2); двойной канал (3)



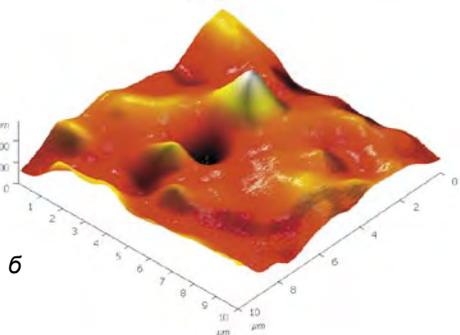
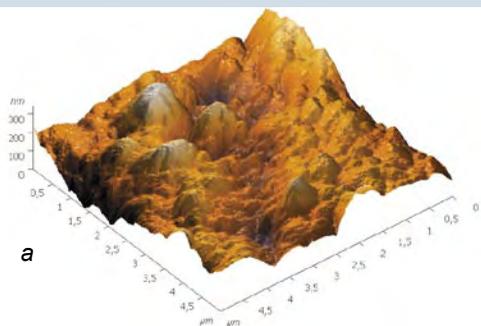
Камера для напыления и имплантации



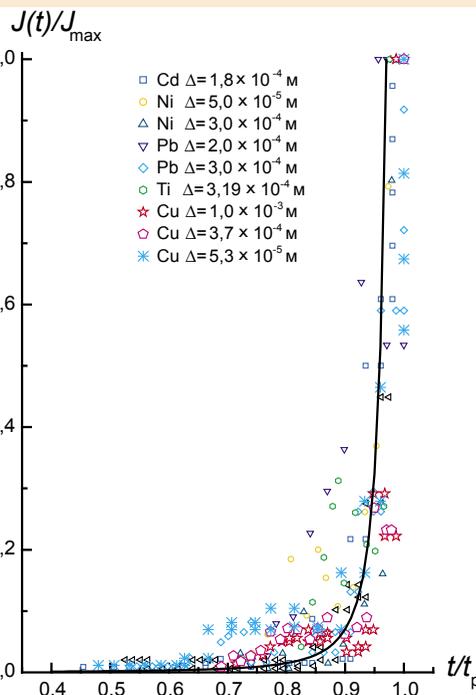
Углеродные нанотрубки



Полимеры, модифицированные углеродными наноструктурами



Поверхность полимеров, модифицированных методом молекулярного наслаивания (а) и углеродными наноструктурами (б)

Скорость накопления центров разрушения в металлическом Рu ($t_p \sim 10^{-8}$ с, $P \sim 4$ ГПа)

С явлением динамического разрушения, вызываемым мощным импульсным энергетическим воздействием на вещество, связаны предельные возможности современной техники и уникальных научных установок: обшивки космического корабля при воздействии микрометеоритов; первой стенки термоядерного реактора; активной зоны импульсного ядерного реактора; внутренних элементов суперколлайдера. Обширный объем расчетно-теоретических и экспериментальных исследований показал масштабно-инвариантные свойства поведения вещества в экстремальных условиях при скорости ввода энергии 10^{12} К/с, времени самоорганизации и границах сохранения функциональных свойств $t \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ с. Результаты исследований позволяют прогнозировать поведение неисследованных материалов в экстремальных условиях и компьютерным способом «конструировать» стойкие к определенным видам воздействия новые материалы в уникальных температурно-временных диапазонах.

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

В РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ИПФ РАН разработана пета-ваттная лазерная система со сверхкороткой длительностью импульса на основе параметрического усиления широкополосных чирпированных лазерных импульсов. Накачка выходного параметрического усилителя (кристалл DKDP световой апертурой 300 мм и толщиной 55 мм) производится преобразованным во вторую гармонику ($\lambda_{\text{нак}} = 527$ нм) излучением лазерного канала установки «Луч» ($E_{\text{нак}} \approx 0,5 - 1,5$ кДж, $\tau_{\text{нак}} = 2,5$ нс). В четырех каскадах параметрического усиления получен коэффициент усиления 10^{11} . Энергия пучка на выходе оконечного параметрического усилителя составила $E_{\text{сигн}} = 100$ Дж на $\lambda_{\text{сигн}} = 911$ нм. Для компрессии импульса применяются четыре дифракционные решетки размером 240×380 мм с плотностью штрихов 1200 мм^{-1} . Длительность скомпрессированного импульса составляет $\tau \approx 60$ фс, что соответствует мощности лазерного излучения $P_{\text{вых}} \approx 1,2$ ПВт. Для фокусировки лазерного пучка на мишень применяется внеосевое параболическое зеркало диаметром 320 мм с фокусным расстоянием 800 мм и собственным кружком рассеяния ≈ 10 мкм

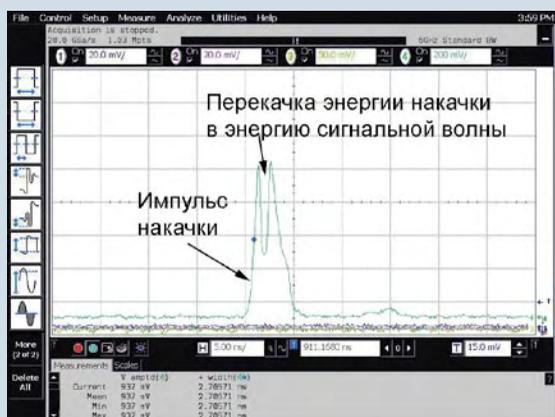
по уровню 80 % энергии, что обеспечивает интенсивность лазерного пучка на мишени $I \sim 10^{20} - 10^{21} \text{ Вт/см}^2$.

Выведен на полномасштабный режим работы стенд КИЛ-10 — химический кислород-йодный лазер непрерывного действия. Принцип действия КИЛ основывается на передаче энергии электронного возбуждения от молекулы синглетного кислорода к излучающей частице — атому йода. Синглетный

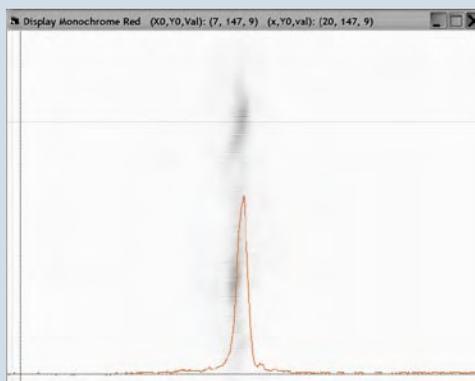
кислород производится в оригинальном, защищенном патентом РФ № 2307434, химическом генераторе синглетного кислорода (ГСК) с уникальными характеристиками: производительность по хлору — до 8 моль/с, химическая эффективность — до 85 %, удельная производительность синглетного кислорода — до $24 \text{ ммоль/(с}\cdot\text{см}^2)$. Эффективность работы генератора не зависит от силы тяжести и ее направления, поэтому он может



Вакуумный компрессор и мишенная камера установки «Луч»



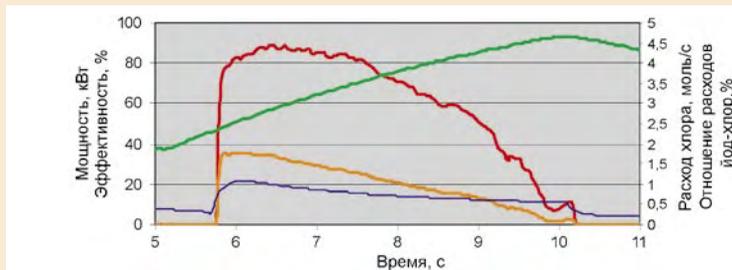
Осциллограмма лазерного импульса накачки на выходе оконечного параметрического усилителя



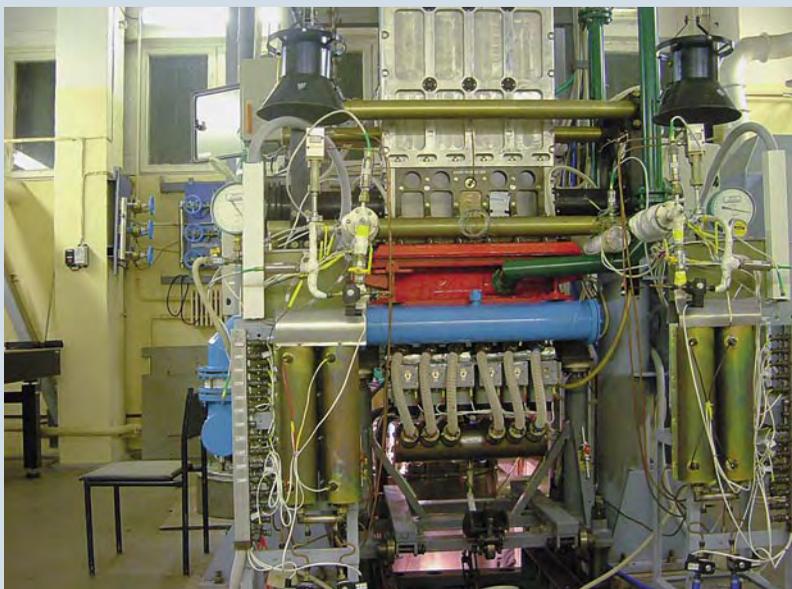
Автокорреляционная функция импульса после компрессии. Соответствует импульсу гауссовой формы длительностью ~ 60 фс

быть использован в условиях тряски, вибраций и невесомости. Под химической эффективностью понимается отношение числа квантов света на выходе из резонатора к числу молекул хлора на входе в ГСК. Максимальная мощность излучения лазера превысила 90 кВт при давлении торможения энергонесущего газа ~ 90 торр, что соответствует химической эффективности лазера 35 %. Приведенная мощность излучения — отношение выходной мощности излучения к площади поперечного сечения потока в резонаторе, 150 Вт/см². Выходная мощность стенда КИЛ-10 превосходит мощность любого из известных по научным публикациям европейского непрерывного кислород-йодного лазера. Судя по опубликованным работам, полученная химическая эффективность КИЛ является рекордной.

На установке «Искра-5» проведены исследования спектральных коэффициентов пропускания плазмы, получаемой при разогреве тонких пленок различных элементов рентгеновским излучением с температурой 70–80 эВ, генерируемым внутри бокса-конвертора. Исследуемый образец размещался на боковой поверхности бокса-конвертора, представляющего собой цилиндр, внутрь которого через торцы вводилось излучение 4 каналов установки «Искра-5». Нагретый образец просвечивался рентгеновским излучением дополнительного источника, образуемого при облучении плоской мишени из диспрозия лазерным излучением еще одного из каналов установки. Спектр прошедшего через образец рентгеновского излучения регистрировался кристаллическим спектрографом. Полученные данные использовались для восстановления спектрального пропускания плазмы. Расчетное моделирование условий разогрева и разлета образца с помощью программ радиационной газовой динамики показало, что использование пленок исследуе-



Типичный импульс генерации в оптимизационных экспериментах. Красная кривая — мощность лазерного излучения; оранжевая — химическая эффективность; зеленая — расход хлора; синяя — отношение расходов йода и хлора



КИЛ-10

мых образцов толщиной менее 0,2 мкм позволяет осуществлять достаточно однородный прогрев плазмы и предотвращать нежелательное ускорение пленки при ее одностороннем облучении рентгеновским излучением. Со-

поставление расчетного пропускания алюминиевой плазмы с учетом ее нагрева и разгрузки в конкретных условиях эксперимента с результатами измерений демонстрирует неплохое согласие расчета и эксперимента.

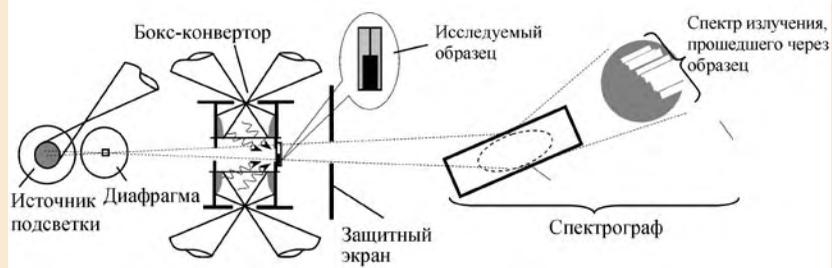
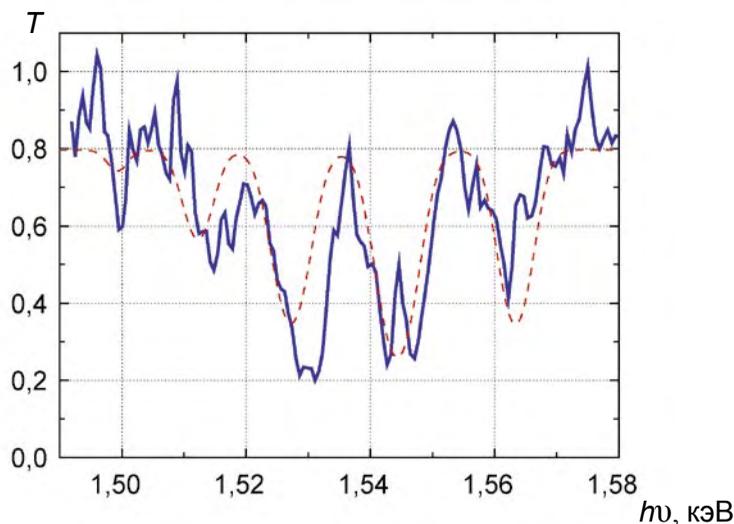


Схема эксперимента по исследованию спектральных характеристик поглощения разогретых материалов на установке «Искра-5»



Экспериментальное (—) и расчетное (---) спектральное пропускание (в диапазоне энергий квантов 1,49–1,58 кэВ) алюминиевой плазмы при толщине слоя образца 0,097 мкм

ведена серия экспериментов по изучению ударной сжимаемости свинца. Максимальное достигнутое давление за фронтом УВ в алюминии составило 18 Мбар, в свинце — 29 Мбар. Полученные на лазерной установке «Луч» результаты совпадают в пределах погрешности с результатами, полученными классическими методами. Тем самым показана возможность генерации мультимегабарных давлений для исследования уравнений состояния веществ на мощных лазерных установках ВНИИЭФ. Приоритетными направлениями работ в настоящее время являются повышение качества мишени и однородности излучения, увеличение точности измерения характеристик УВ, увеличение давлений до ~ 50 Мбар.

На лазерной установке «Луч» проводятся эксперименты по отработке методов изучения ударной сжимаемости веществ в мультимегабарном диапазоне давлений. В исследованиях применяется метод «отражения». Для формирования стационарной ударной волны (УВ) используется базовый слой из алюминия толщиной 20–100 мкм, на обратной стороне которого напылены две ступеньки толщиной в несколько микрометров. При известной толщине ступенек скорость УВ в исследуемом образце и эталоне определяется по времени выхода УВ на тыльную поверхность. Момент выхода УВ фиксируется по свечению тыльной поверхности мишени с помощью пикосекундного электронно-оптического фотохронографа. Высокое давление создается при нагревании твердого тела интенсивным (10^{13} – 10^{15} Вт/см²) лазерным излучением второй гармоники (эксперименты прямого облучения). Пятно облучения размером 300×600 мкм формируется с помощью расправочной линзы Френеля. Про-

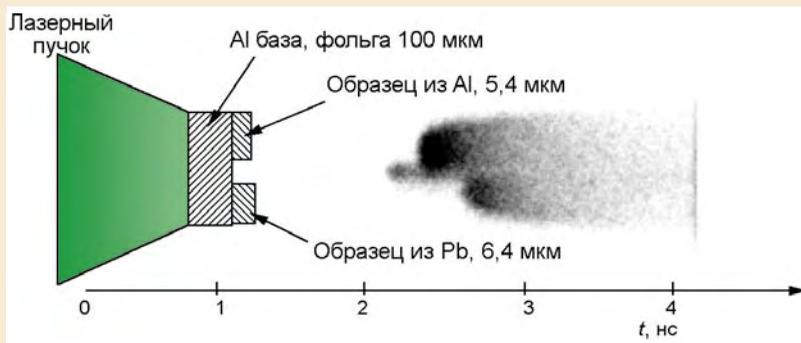
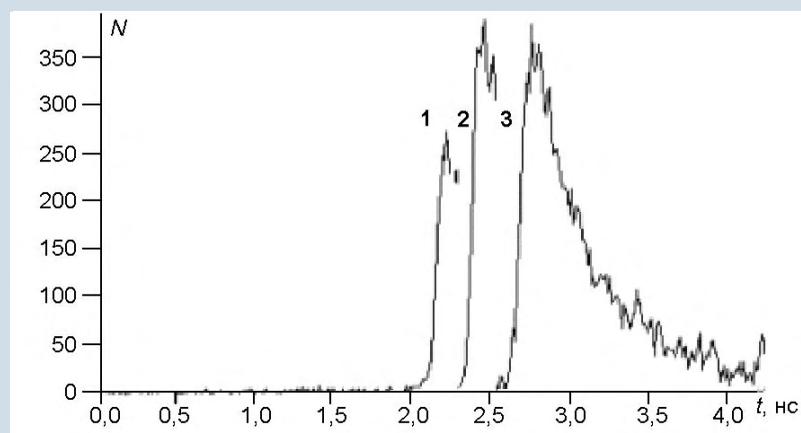
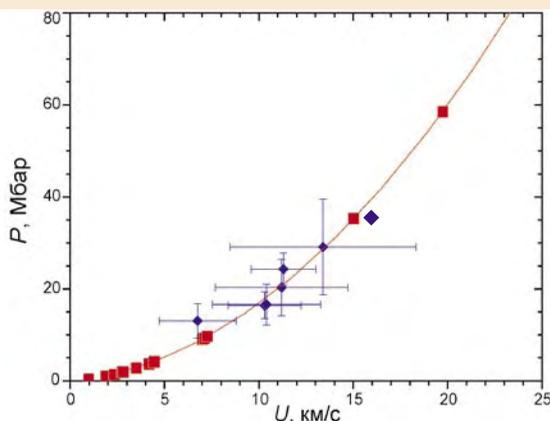


Схема эксперимента по исследованию ударной сжимаемости веществ методом отражения на лазерной установке «Луч»



Регистрация времени выхода УВ в базовом слое (1), алюминиевой (2) и свинцовой (3) ступеньках



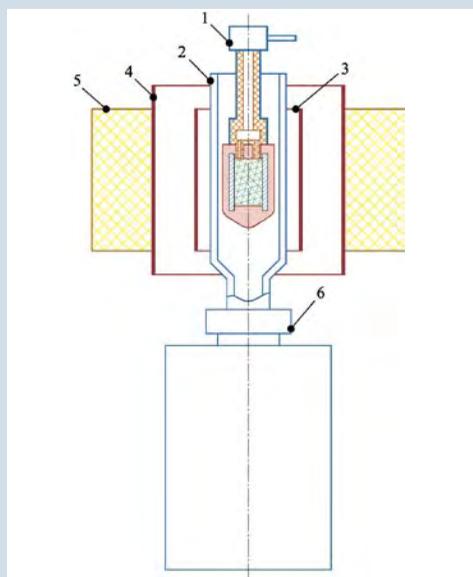
Ударная адиабата свинца: ■ — данные сборника: Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006; ◆ — результаты экспериментов на установке «Луч»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ (НТЦФ)

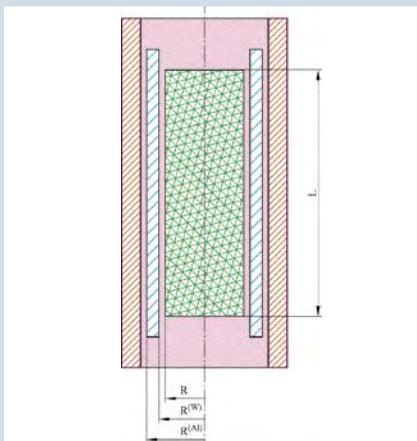
Проведена серия экспериментов по исследованию нулевых изотерм изотопов водорода — кристаллического протия и кристаллического дейтерия, изэнтропически сжатых до давлений в несколько мегабар. Процесс осуществлялся в устройстве, состоящем из генератора МК-1 сверхсильного магнитного поля (источник давления), камеры сжатия и криостата. Режим работы генератора и геометрия камеры сжатия с помощью предварительных расчетов оптимизировались с целью обеспечения в рабочей зоне минимальных градиентов давления. В каждом из опытов в один из моментов сжатия производилось рентгенографирование центральной части сборки. По снимку, используя усовершенствованную методику обработки изображений, находили размеры (а следовательно, и сжатие) исследуемого и коаксиально с ним расположенного образца эталонного вещества (Al). С помощью известной изэнтропы эталона определялось (после учета градиентной поправки) давление в исследуемом

веществе. В итоге в интервале давлений от 1 до 5 Мбар получены экспериментальные точки, соответствующие нулевым изотермам протия и дейтерия. В обоих случаях аппроксимирующая кривая в пределах погрешностей согласуется с экстраполяцией

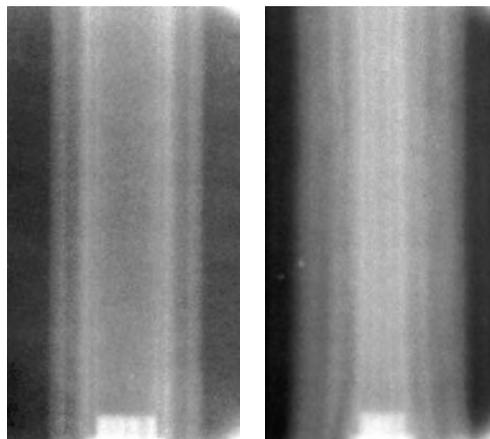
изотермы, построенной ранее по данным статических экспериментов (алмазные наковальни) до давлений ~ 1 Мбар. Кроме того, полученная для протия кривая согласуется и с результатами опубликованных первопринципных расчетов для H_2 .



Устройство сжатия: 1 — криоконтейнер с камерой сжатия; 2 — криопровод; 3 — второй каскад МК генератора; 4 — соленоид начального поля генератора (первый каскад); 5 — кольцевой заряд ВВ; 6 — сосуд для хранения жидкого гелия

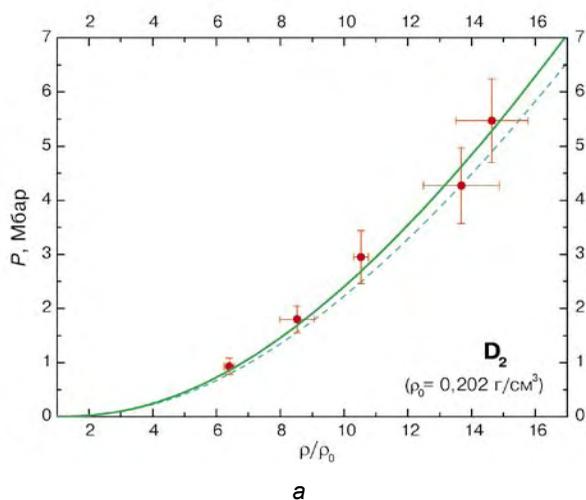


Расположение образцов в камере сжатия (тонкие контрастирующие слои, отделяющие алюминий от стенки камеры — толстостенной медной трубки — и исследуемого образца выполнены из вольфрамового сплава, из него же изготовлены торцевые заглушки, предотвращающие осевое истечение исследуемого вещества)

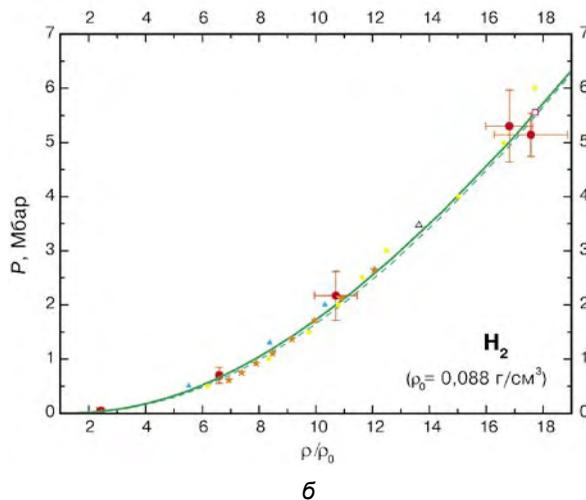


а б

Экспериментальные рентгенограммы:
а — образец в начальном состоянии;
б — момент сжатия



а



б

*P-ρ диаграммы (сплошная линии выше 5,5 Мбар — экстраполяция нижележащего участка):
а — дейтерий; б — протий: ● — эксперимент; — — — — аппроксимирующая кривая; - - - - - экстраполяция результатов, полученных на алмазных наковальнях; значки — расчет по различным источникам*

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Исследовались гигантские восходящие разряды в стратосфере Земли и разряды обычной молнии в тропосфере как источники атмосферных вспышек γ -излучения, зарегистрированных с борта искусственных спутников Земли США CGRO

в 1995 г. и RHESSI в 2005 г., и усиленного потока нейтронов в грозовой атмосфере, наблюдавшегося на поверхности Земли в Индии (1985 и 1999 гг.) и России (2004 г.). В рамках специально разработанной численной модели с много-

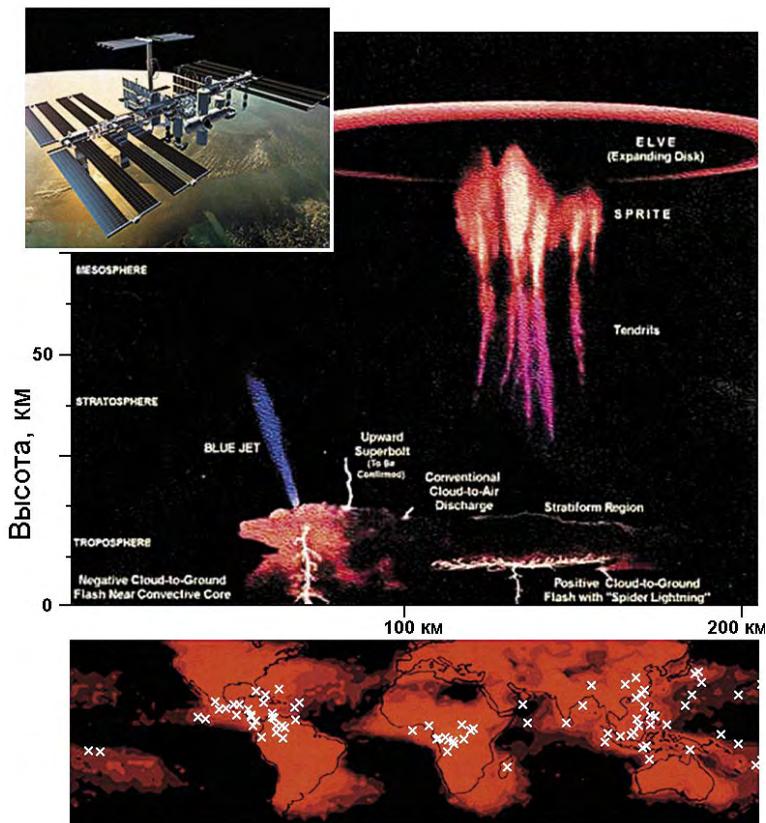
групповым описанием кинетики релятивистских электронов рассчитаны импульсы γ -излучения. Рассчитанные поток, средние энергии и спектры γ -квантов в ближнем космосе согласуются с результатами измерений. Подтверждены результаты анализа

экспериментальных данных (США), согласно которым источник γ -вспышек находится в верхней тропосфере — нижней стратосфере. Показано, что синтез ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$ в канале

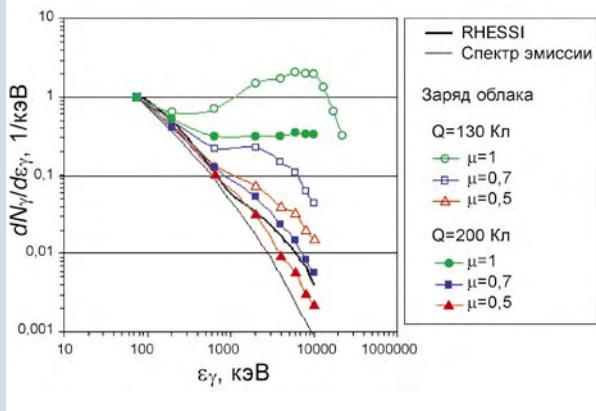
обычной молнии, с которым связывалось усиление потока нейтронов, абсолютно невозможен, а нейтроны генерируются фотоядерными реакциями. Рассчитанный (γ, n) выход из

восходящего разряда и канала молнии равен соответственно 10^{14} - 10^{15} и $4 \cdot 10^{13}$ нейтронов, причем наблюдавшееся усиление связано с разрядами молнии, поскольку нейтроны восходящего разряда полностью поглощаются в плотной атмосфере.

В электрофизическом отделении традиционно используется устройство, состоящее из дискового взрывомагнитного генератора (ВМГ) и фольгового размыкателя тока, представляющего собой медную фольгу толщиной 0,15–0,19 мм, размещенную между изоляторами в передающей линии дискового ВМГ. В настоящее время разработана и испытана новая конструкция электровзрывного размыкателя тока, в котором медная фольга укладывается полосками между двумя гофрированными радиальными изоляторами. Конструкция проста, надежна и позволяет значительно уменьшить габариты размыкателя тока и всего устройства. Использование гофрированного размыкателя тока позволило передать в нагрузку ток ~ 17 МА за время ~ 1 мкс. Полученные в эксперименте данные коррелируют с результатами расчетов, что свидетельствует о правильном выборе расчетной модели.



Высотные оптические явления над грозовыми облаками



Спектры гамма-излучения на высоте орбиты RHESSI для трех ориентаций спутника относительно источника. μ — косинус угла между вертикалью и направлением на спутник

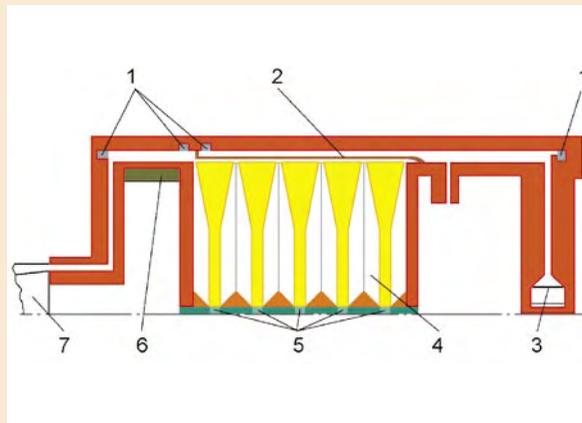


Схема дискового ВМГ: 1 — датчики; 2 — электро-взрывной фольговый размыкатель; 3 — лайнер; 4 — дисковый генератор; 5 — детонаторы; 6 — узел отключения; 7 — спиральный генератор



Модифицированный дисковый ВМГ

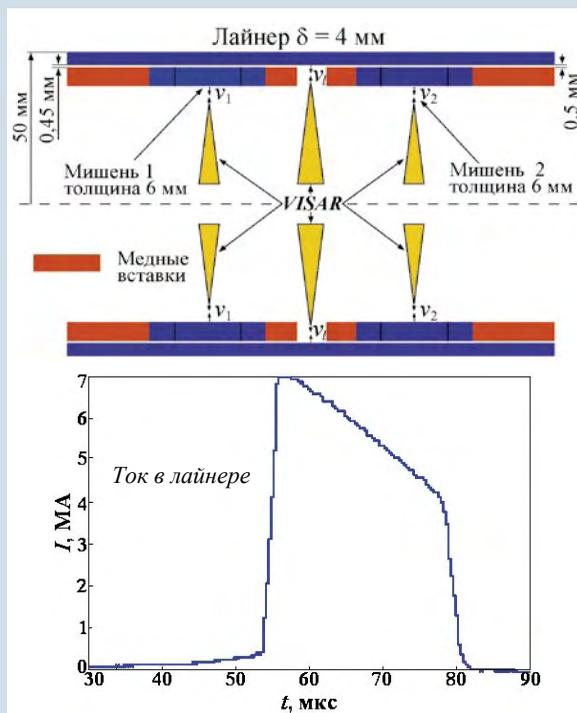
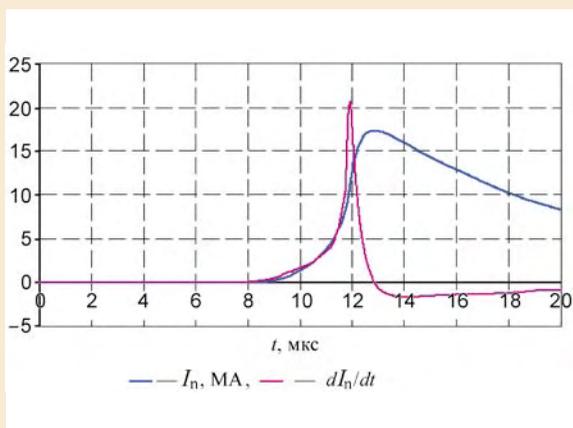
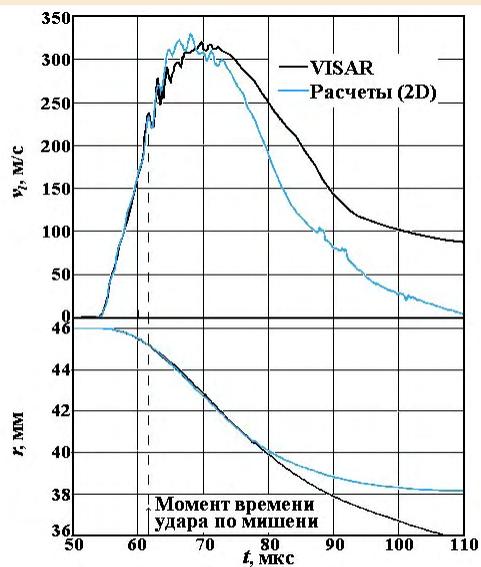


Схема исследований



Осциллограмма тока и его производной в нагрузке

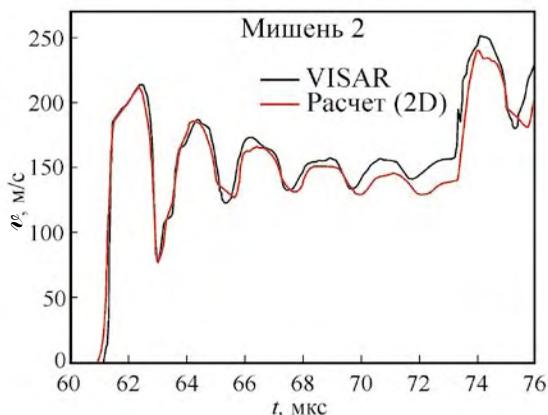
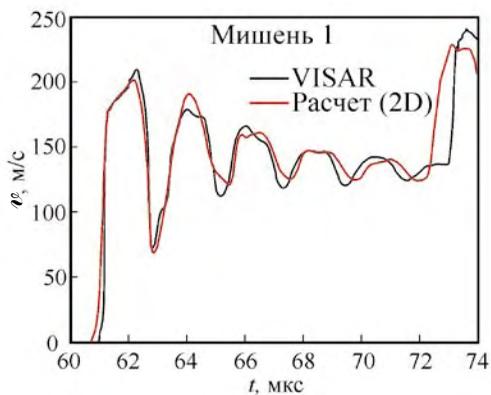


Динамика лайнера

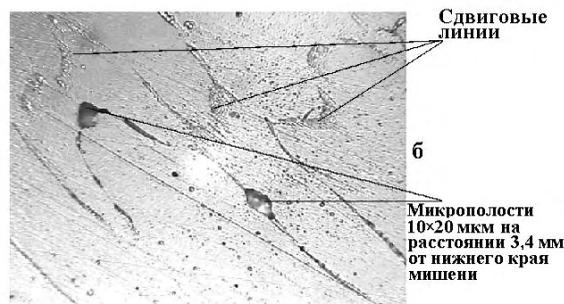
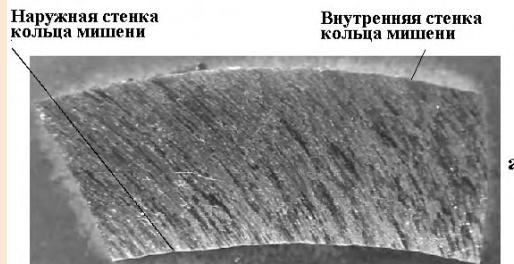
Проведены эксперименты R-Damage 3, 4, 5 в сходящейся геометрии с ударом по мишеням цилиндрического лайнера (все из Al 1100), разгонявшегося импульсом тока от взрывомагнитного устройства. Диагностика включала измерение скоростей поверхностей с помощью VISAR, радиаль-

ную рентгенографию, металлографию мишеней после опытов. Цель экспериментов: сравнение зарегистрированной динамики движения лайнера и мишеней, зарождения повреждений и радиусов остановки внутренних поверхностей мишеней с результатами численного моделирова-

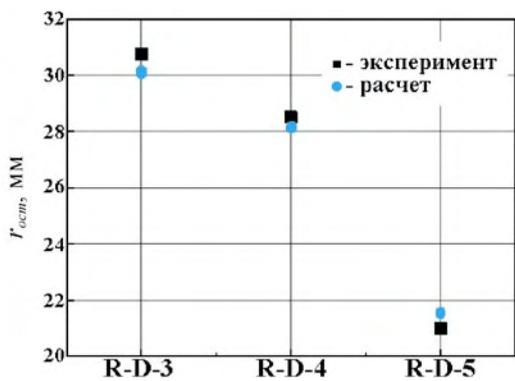
ния по программному комплексу ДРАКОН для использования в расчетах упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближениях. В расчетах использована феноменологическая модель прочности со стационарным пределом текучести.



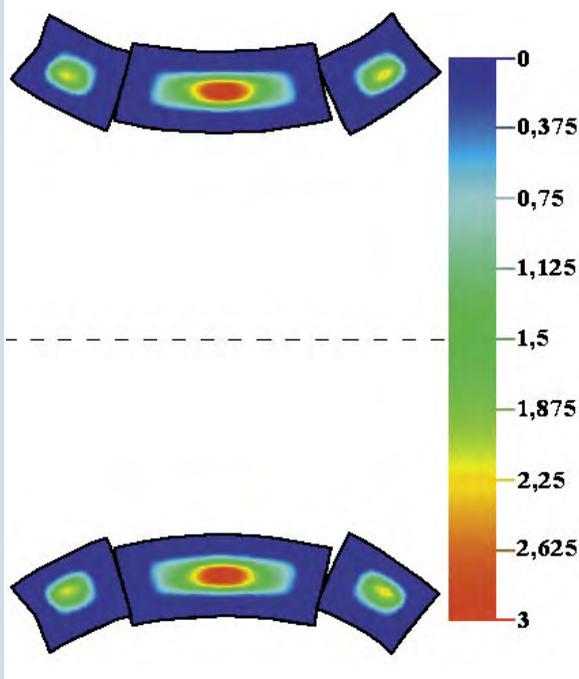
Динамика мишеней



Опыт R-D-5, мишень 2:
а — образец после опыта;
б — увеличение в 400 раз
(поврежденность 3–4 %)



Радиусы остановки мишеней



Расчетные распределения поврежденности в мишени 2 (%)

Скорости удара лайнера по мишеням

Опыт	R-D-3		R-D-4		R-D-5	
Мишень	1	2	1	2	1	2
$v_{уд}$, м/с	135,4	142,5	120,6	127,6	161,2	169,7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

В РФЯЦ-ВНИИЭФ освоена и развита технология получения пористого материала на основе проволочных спиралей. Сцепленные спирали не спекаются, что обеспечивает их взаимную подвижность с внутренним трением. Проволочный пресс-материал имеет упруго-демпфирующие, фильтрующие, адсорбирующие, капиллярные и электропроводящие свойства. Исходным сырьем служит любая металлическая проволока

(алюминий, медь, бронза, сталь, молибден, вольфрам) диаметром 50–500 мкм. Пористость материала от 35 до ~95 %.

Элементы из проволочного пресс-материала находят широкое применение в качестве виброгасителей в системах виброзащиты и в качестве эластичных подушек подшипников в турбинах и центрифугах.

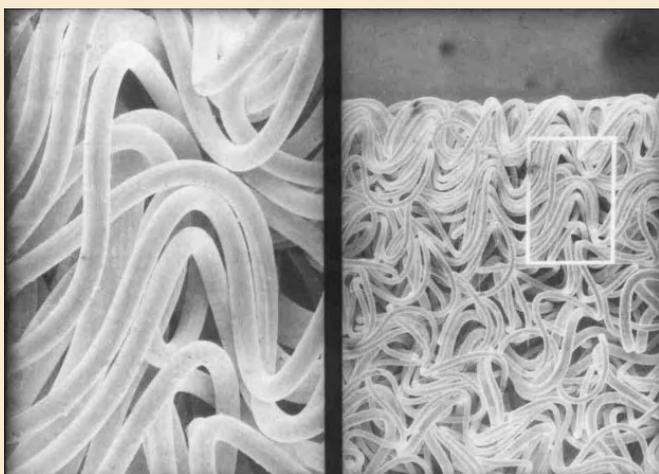
Новый материал применяется для изготовления фильтрующих элементов, тепловая и

химическая стойкость которых определяется свойствами исходной проволоки. Это позволяет использовать его в агрессивных газовых и жидких средах при повышенных температурах. Фильтры из проволочного пресс-материала можно регенерировать с целью восстановления исходной проницаемости.

При диаметре исходной проволоки ~20–50 мкм проволочный пресс-материал можно использовать для изготовления элементов капиллярного транспорта или фитилей тепловых труб. После пропитки каркаса расплавленным материалом матрицы получают композиционные материалы с различными свойствами, например антифрикционные или абляционные.

Теплозащитные свойства материала используются в системах с пористым охлаждением.

Разработаны технологические процессы изготовления деталей в форме пластины, кольца, втулки, нетканого полотна. Детали из проволочного пресс-материала используются в новейших разработках РФЯЦ-ВНИИЭФ.



Проволочный пресс-материал





Детали и элементы из проволочного пресс-материала

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

Создан стенд для испытания приборов на воздействие импульсных линейных ускорений. Короткоствольное пороховое разгонное устройство калибром 170 мм и платформа с объектом испытаний устанавливаются посредством опор скольжения на две рельсовые направляющие: верхнюю (короткую) и нижнюю (длинную). Хвостовая часть платформы в виде поршня беззазорно входит в ствол разгонного устройства. В процессе

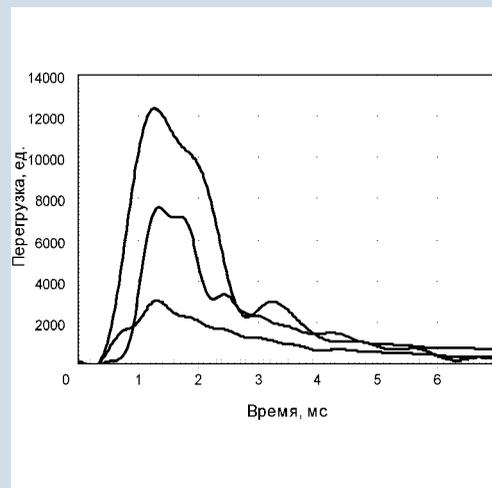
выстрела платформа перемещается по обеим направляющим, а затем тормозится на нижней направляющей с перегрузкой, не превышающей 50 ед.

Новая поршневая пневматическая ударная труба УТ-400 калибром 400 мм и длиной 15 м позволяет создавать ударные волны амплитудой 1–10 кПа и длительностью до 2,5 с, подобные по форме ударным волнам, образующимся в атмосфере при взрыве сосредоточенных за-

рядов. Большая длительность ударных волн при малых габаритах установки достигнута с помощью специального выхлопного устройства, которое компенсирует влияние окружающей атмосферы, а волновод трубы ведет себя подобно бесконечной трубе. Ударная волна создается при помощи двух вскрываемых пленочных мембран и поршня, движущегося по заданному закону под действием упругого амортизатора.



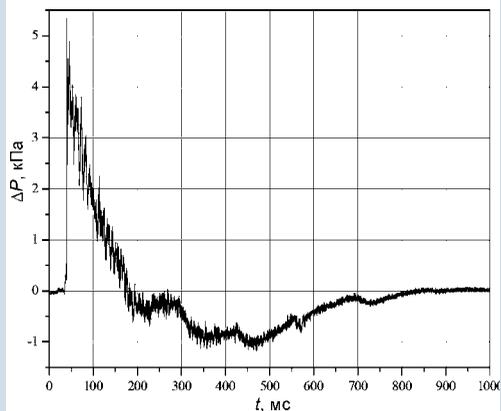
Стенд для испытания приборов на воздействие импульсных линейных ускорений



Зависимость перегрузки от времени при испытаниях объекта массой ≈ 1 кг



Ударная труба УТ-400



Зависимость давления от времени в волноводе установки

В 2005 – 2007 годах в РФЯЦ-ВНИИЭФ создана методика определения координат объекта испытаний (ОИ) в характерных точках траектории, основанная на регистрации момента срабатывания пиротехнических устройств ОИ и измерении параметров воздушных ударных (акустических) волн в расположенных на земле измерительных точках (ИТ). Метод показал

свою надежность, достаточную точность (относительная погрешность определения каждой из координат не превышает 1%), работоспособность в условиях полигона при высотах до 4500 м и уровне регистрируемого давления 0,1 Па. Практически нечувствительный к погодным условиям, малозатратный метод позволяет определять координаты при испытаниях на необорудованных

испытательных площадках и вне зависимости от взаимного расположения ОИ и ИТ.

В государственных испытаниях в ряде экспериментов методика была единственным источником данных.

Метод защищен патентом РФ № 2285890 и приоритетной справкой № 2006141894.

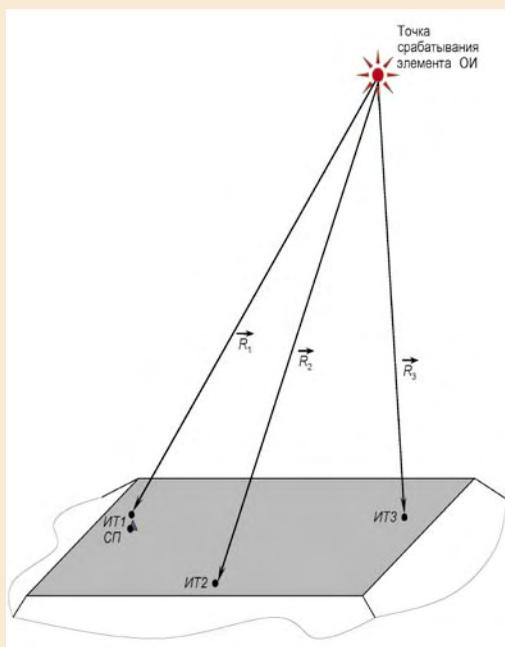
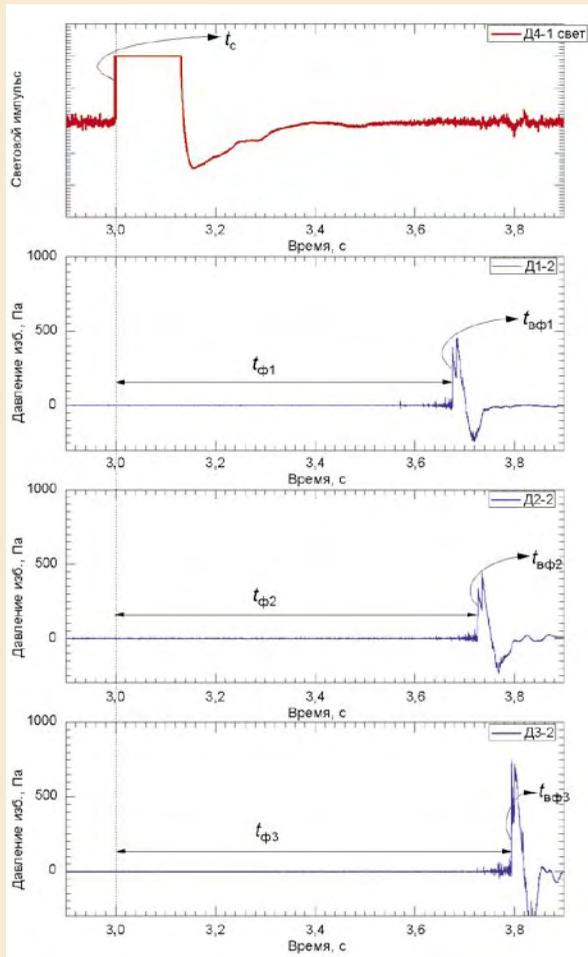


Схема постановки измерений (СП — светоприемник; ИТ1, ИТ2, ИТ3 — измерительные точки; $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3$ — векторы распространения ВУВ)



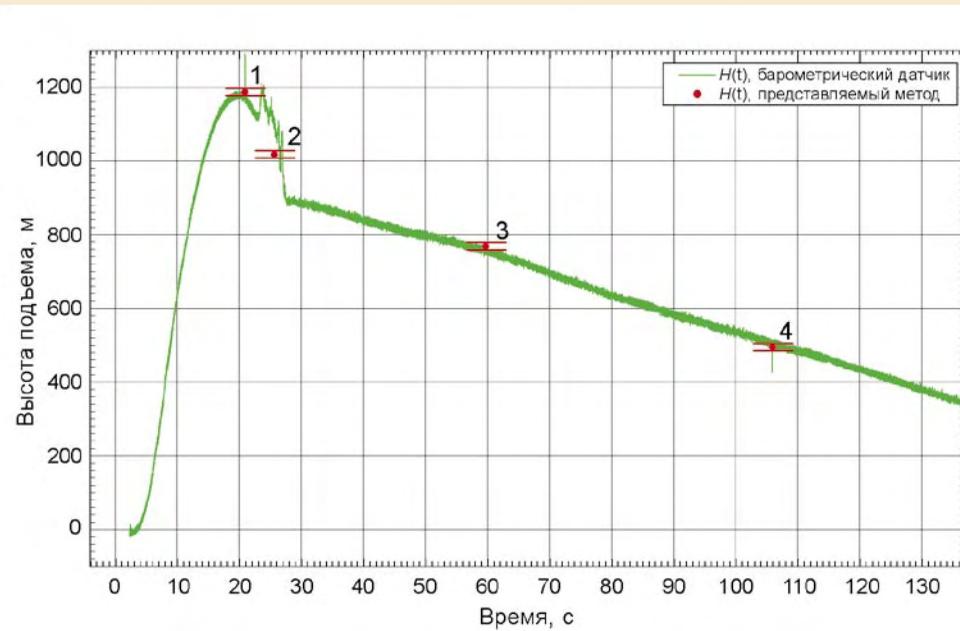
Срабатывание ОИ



Профили сигналов ИТ



Измерительная точка



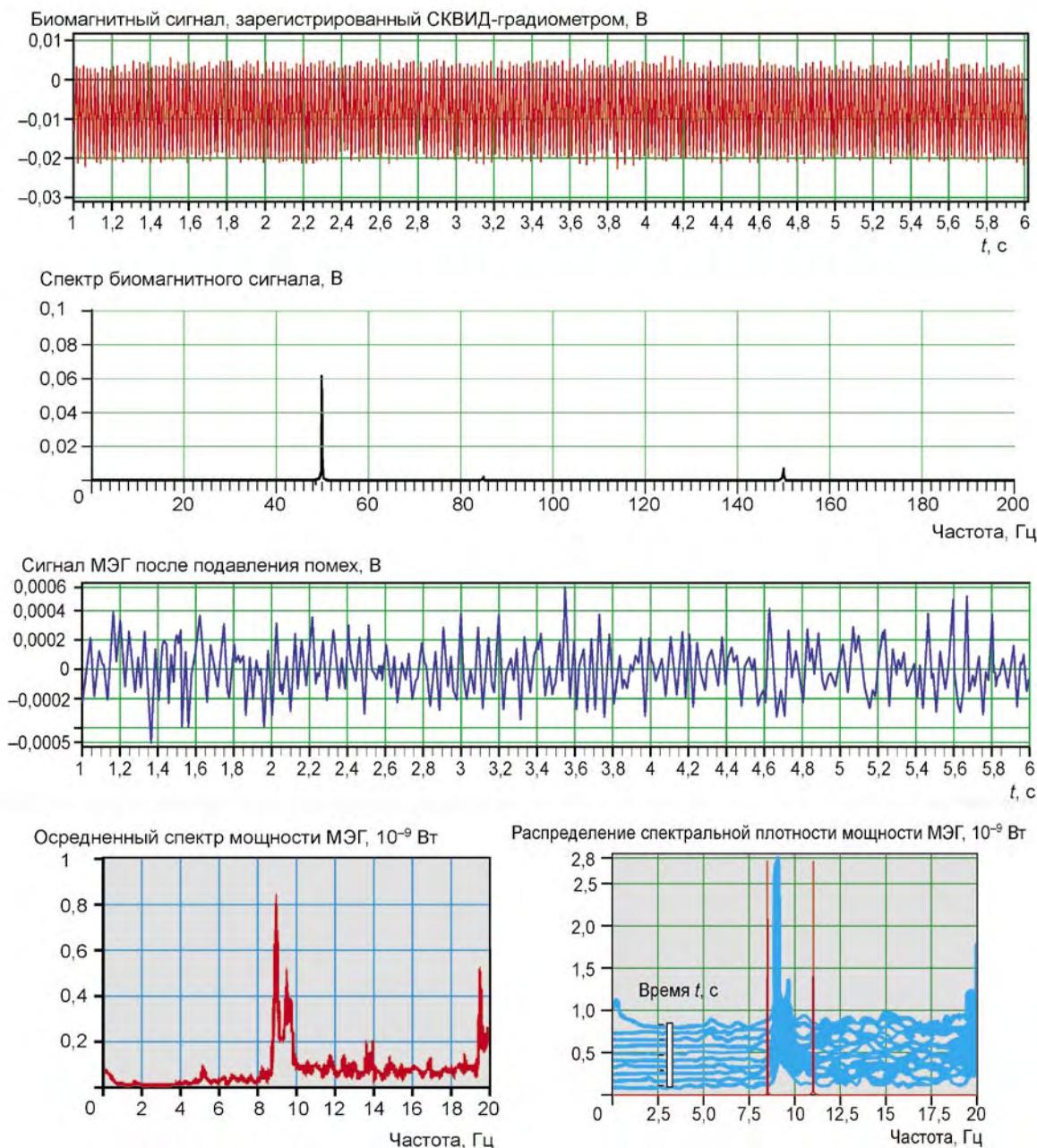
Определение высоты подъема ОИ представляемым методом и барометрическим способом

ОТДЕЛЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Решена задача сверхпроводящей магнитоэнцефалографии (МЭГ) с помощью разработанной методики математической обработки зашумленного биомагнитного сигнала, полученного в условиях слабой экранировки или ее отсутствия. Методика позволяет выделять МЭГ человека

и животных при уровне внешних помех и шумов измерительного тракта, превышающем амплитуду биомагнитного сигнала и вплоть до 120 дБ, и оценивать динамические параметры спонтанной и вызванной магнитной активности головного мозга. Совершенствование этого уникального метода

неинвазивной нейрофизиологической диагностики позволит использовать магнитометрию на основе низкотемпературных сверхпроводящих квантовых интерферометрических датчиков (СКВИД) при оценке психофизиологического состояния лиц опасных профессий.



Методика выделения МЭГ из сильнозашумленного биомагнитного сигнала

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЯЦ-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 7-75-84
- по электронной почте kul@otd68.vniief.ru



2007

Подписано в печать 10.04.2008 г.
Формат 60×84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4. Уч.-изд. л. 3,5.
Тираж 600 экз. Зак. тип. 789-2008.
Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
607190, г. Саров Нижегородской обл.,
ул. Силкина, д. 23

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008