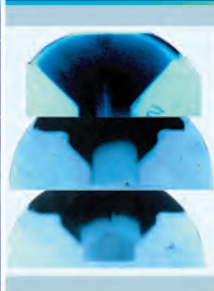


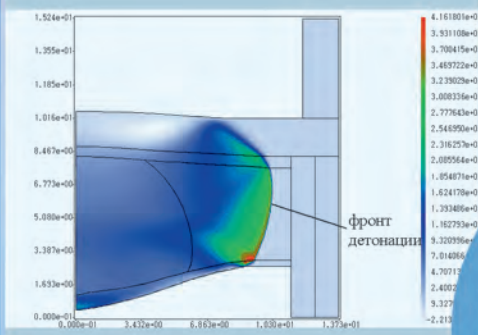
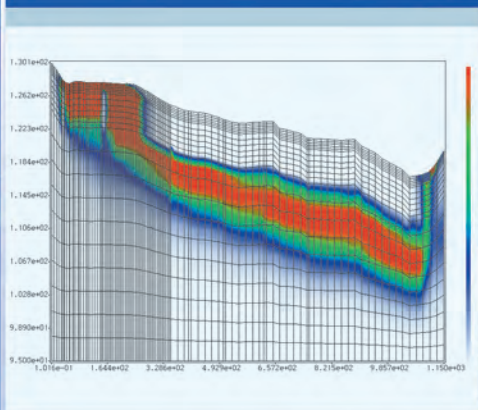


# ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ



РФЯЦ-ВНИИЭФ

# 2005

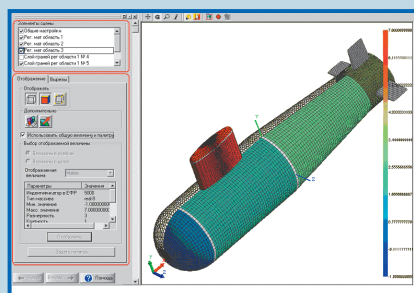


САРОВ  
2006

## СОДЕРЖАНИЕ

2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



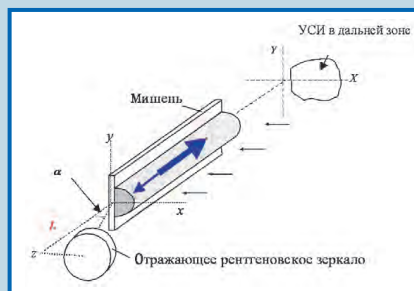
12

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЗРЫВА



19

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-  
ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



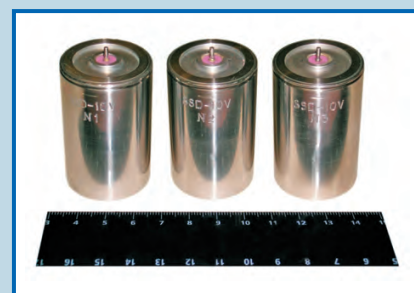
24

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



26

ОТДЕЛЕНИЕ ТРИТИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И СРЕДСТВ ИНИЦИИРОВАНИЯ



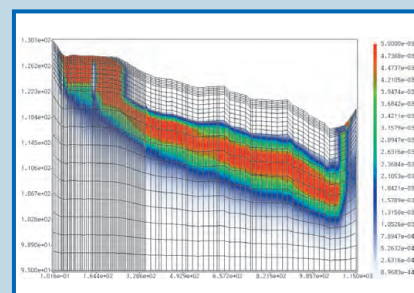
27

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
КОМПЛЕКС



29

ОТДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



33

РАЗРАБОТКА НЕЯДЕРНЫХ  
ВООРУЖЕНИЙ



Редколлегия выпуска:  
академик РАН Р. И. Илькаев;  
д-р физ.-мат. наук В. П. Незнамов;  
д-р физ.-мат. наук А. Н. Сизов;  
д-р физ.-мат. наук С. Г. Гаранин;  
канд. физ.-мат. наук А. В. Ивановский;

Е. В. Куличкова;  
д-р техн. наук А. Л. Михайлов;  
д-р физ.-мат. наук В. А. Разуваев;  
канд. физ.-мат. наук В. П. Соловьев;  
д-р физ.-мат. наук Р. М. Шагалиев.

Подписано в печать 02.03.2006. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3. Уч.-изд. л. 2.5.  
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 28-2006.  
Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
607190, г. Саров Нижегородской обл.,  
ул. Силкина, 23



*Директор РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
академик РАН Р. И. Илькаев*



Очередной ежегодный выпуск научно-информационного издания «Достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ» выходит в юбилейный год, год 60-летия основания нашего Института. Успехи каждого года являются результатом деятельности института за весь предыдущий период его существования. Поэтому, освещая достижения 2005 года, мы в определенной степени подводим итоги всего 60-летнего развития РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

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

Значительные успехи за прошедший год достигнуты в разработке и создании многомерных математических методик и программных комплексов нового поколения для эффективного компьютерного моделирования физических процессов на многопроцессорных ЭВМ с массовым параллелизмом на базе усовершенствованных физико-математических моделей. Создаваемые комплексы объединяют различные математические методы и методики в едином для них интерфейсе, используют единые для всех комплексов программные и аппаратные средства графического сервиса для подготовки данных, проведения расчетов, обработки и хранения результатов расчетов. В 2005 году:

- Создан и сдан в эксплуатацию комплекс программ, объединяющий возможности методик МИМОЗА и Д для расчета широкого класса двумерных и трехмерных задач механики сплошной среды на многопроцессорных ЭВМ.

- Создан и сдан в эксплуатацию комплекс программ ЛЭГАК-3D для двумерных и трехмерных расчетов в параллельном режиме процессов газовой динамики в лагранжево-эйлеровом приближении с учетом различных моделей упругопластического деформирования и кинетики детонации ВВ.

- Завершены работы по созданию нового комплекса САТУРН, предназначенного для численно-

го моделирования многомерных задач переноса в многогрупповом кинетическом приближении. Комплекс ориентирован на проведение расчетов многомерных задач переноса нейтронов, гамма-квантов и неравновесного рентгеновского излучения на большом числе процессоров современных ЭВМ, что значительно сократит сроки проведения расчетов. Организация комплекса позволяет оперативно развивать и внедрять в расчеты этих классов задач новые физико-математические модели и методики. Комплекс сдан в опытную эксплуатацию.

- Разработан проект многофункционального комплекса программ для расчета двумерных и трехмерных задач теплопереноса и анализа напряженно-деформированного состояния конструкций на высокопараллельных ЭВМ. Разработаны основные положения методики и базовые алгоритмы расчета уравнений Навье — Стокса и теплопереноса.

- Завершен важный этап по созданию комплекса для решения нестационарных двумерных и трехмерных нелинейных задач переноса энергии излучением, электронами и ионами с учетом неравновесности процессов взаимодействия:

- разработана численная схема и система поддержки параллельных вычислений для вакуумных областей, включая расчеты коэффициентов видимости;

- созданы параллельные версии основных счетных модулей комплекса.

Традиционно в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ большое внимание уделяется совершенствованию и разработке новых физико-математических моделей, их адаптации и внедрению в математические методики, а также развитию и совершенствованию математических методик, ком-

плексов программ и их связей для совместного учета различных физических процессов при численном моделировании различных прикладных задач.

Основные результаты, полученные в 2005 году по этим направлениям:

- Создан связанный программный комплекс для расчета газодинамических процессов по методике ЛЭГАК с учетом вклада от нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло. Этот комплекс в процессе счета использует спектральные константы взаимодействия нейтронов и гамма-квантов с веществом из библиотек ядерно-физических данных.

- Разработана методика для расчета двумерных течений разреженной плазмы в приближении многокомпонентной газодинамики. Реализована шестипотоковая модель плазмы. Проведены первые расчеты.

- Усовершенствована методика расчета одномерного движения в «многопотоковом» приближении разреженной плазмы в магнитном поле. В методику введена шестипотоковая модель.

- Разработана методика расчета трехмерных течений плазмы в нейтральной атмосфере с учетом геомагнитного поля. Проведены первые производственные расчеты.

- Создан программный комплекс для расчета методом Монте-Карло гамма-нейтронных изображений по результатам двумерных расчетов задач газодинамики и переноса частиц и излучения.

- Завершена работа над программой расчета в  $1d3v$ -приближении (в кинетических уравнениях для плазмы оставлены одна пространственная координата и три скоростных координаты) взаимодействия лазерного излучения с бесстолкновитель-

ной плазмой. Выполнена ее калибровка на задачах, имеющих аналитическое решение, и на задачах, опубликованных в научной литературе. Совместно с сотрудниками ИЛФИ проведено численное исследование нескольких режимов взаимодействия мощного лазерного излучения фемтосекундной длительности с плазмой.

- Существенное развитие в методиках получила модель кинетики детонации взрывчатых веществ (МК):

- изучен и включен в модель алгоритм учета «медленных реакций», связанных с экзотермическим процессом роста углеродных кластеров за пределами зоны химической реакции, который позволяет точнее моделировать динамику разгона пластин и оболочек при контактном взрыве ВВ;

- уточнена зависимость увеличения ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ при снижении начальной плотности. На рисунке представлены экспериментальная рентгенограмма, полученная в ИФВ, и поле плотностей в расчете при инициировании детонации на расходящейся ударной волне в образце ВВ на основе ТАТБ с на-

чальной плотностью  $1,875 \text{ г/см}^3$ . В этих условиях образец с номинальной плотностью  $1,91 \text{ г/см}^3$  не детонирует;

- проведена верификация модели МК для чувствительного взрывчатого состава на основе октогена и успешно рассчитан ряд производственных задач.

- Разработана методика численного моделирования динамики газожидкостных сред с выделением контактных границ и учетом диспергирования на неустойчивых границах жидкость-газ. Проведены методические расчеты по калибровке модели на характерных для задач Института течениях.

- Разработана методика и проведена серия расчетов задач молекулярно-динамического моделирования зарождения и развития микротрещин в кристаллических структурах при динамическом нагружении.

- Разработана и внедрена двумерная методика расчета смешанных ячеек в односкоростной гетерогенной среде (модель Рахматулина). Модель предполагает различную сжимаемость компонентов среды и описывает такие среды, как пена, газожидкостная и пузырьковая

среды, аэрозоль, пористые материалы. Эти среды характеризуются тем, что скорость звука в них меньше, чем скорость звука в отдельных компонентах.

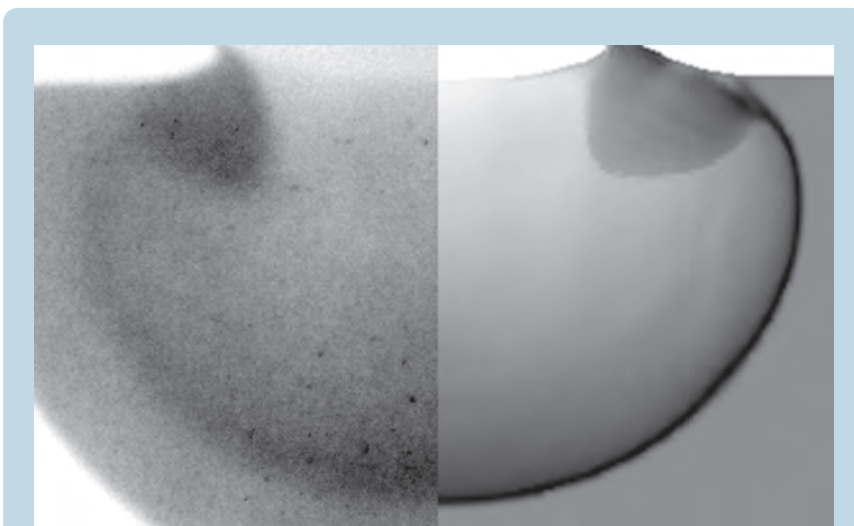
- В двумерном комплексе САТУРН реализована методика расчета процессов переноса быстрых заряженных частиц с учетом реакций «на лету». Методика внедрена в расчеты неравновесного энерговыделения.

- В комплексе САТУРН дополнительно реализованы разностные схемы:  $DS_n$ AD-схема (with Artificial Dissipation) с введением в уравнение переноса диссипативных членов и характеристическая схема (или схема типа характеристических трубок) — СТ-схема (Characteristic Tube scheme). По сравнению со схемами  $DS_n$ -метода новые схемы обладают лучшими монотонными свойствами. При этом по точности решения  $DS_n$ AD-схема не уступает схеме  $DS_n$ -метода.

- В плане усовершенствования моделей уравнений состояния (УРС) веществ с целью расширения их области применимости и повышения точности описания экспериментальных данных:

- модифицирована модель РОСА-М, расширяющая области применимости по температуре и плотности. Получена модель для использования в полуэмпирических УРС металлов;

- разработана методика построения широкодиапазонных УРС с использованием сшивки УРС, предназначенных для описания поведения веществ в разных областях. При этом для полученного уравнения выполняются условия термодинамической согласованности. Работоспособность методики проиллюстрирована на примере построения широкодиапазонного УРС урана, для которого в качестве исходных выбраны УРС РОСА-М и УРС, полученный по модели Томаса — Ферми с поправками Копышева (ТФПК);



Эксперимент

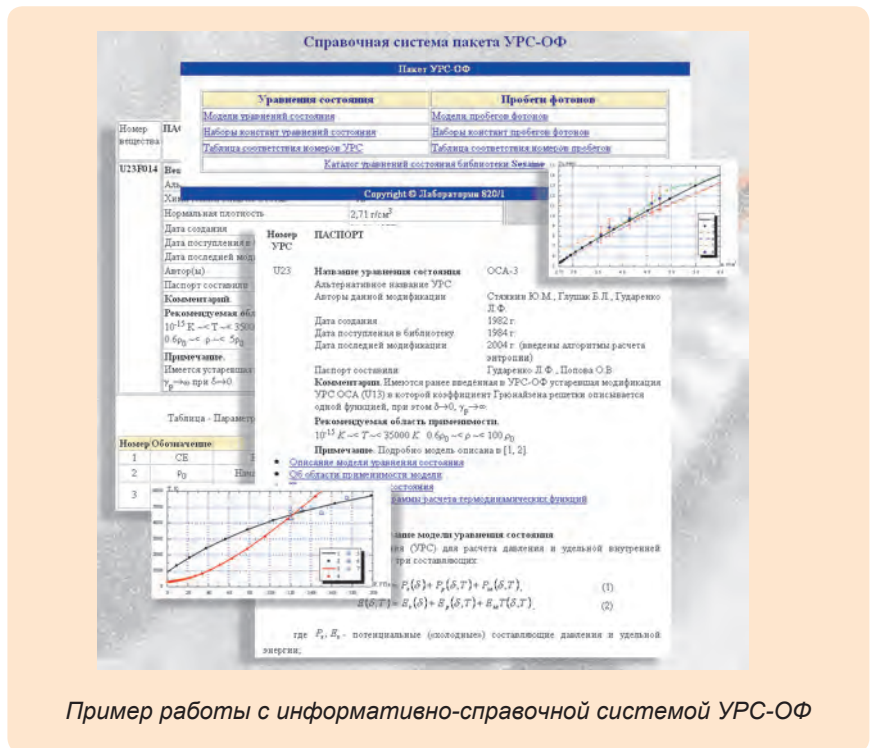
Расчет

Поле плотностей в эксперименте и расчете: светлая область — продукты взрыва, более темная — зона невыгоревшего ВВ

— реализованы современные технологии управления информацией в интерактивной справочной системе пакета УРС-ОФ (единый пакет уравнений состояния и пробегов веществ), что позволило формализовать процедуру наполнения базы данных и уменьшить вероятность ошибок.

Среди новых математических методов и алгоритмов, повышающих точность и технологичность расчетов при математическом моделировании:

- метод численного решения двумерного нелинейного уравнения теплопроводности на комбинированных расчетных сетках (структурируемых и неструктурируемых). Метод позволяет проводить расчеты задач со сложной геометрией с одновременным использованием регулярного метода на структурируемых расчетных сетках и нерегулярного метода на неструктурируемых расчетных сетках. Как показали результаты тестирования, метод обеспечивает хорошую точность расчетов и является «безаварийным»;
- новый алгоритм монотонизации  $DS_n^y$ -схемы при решении

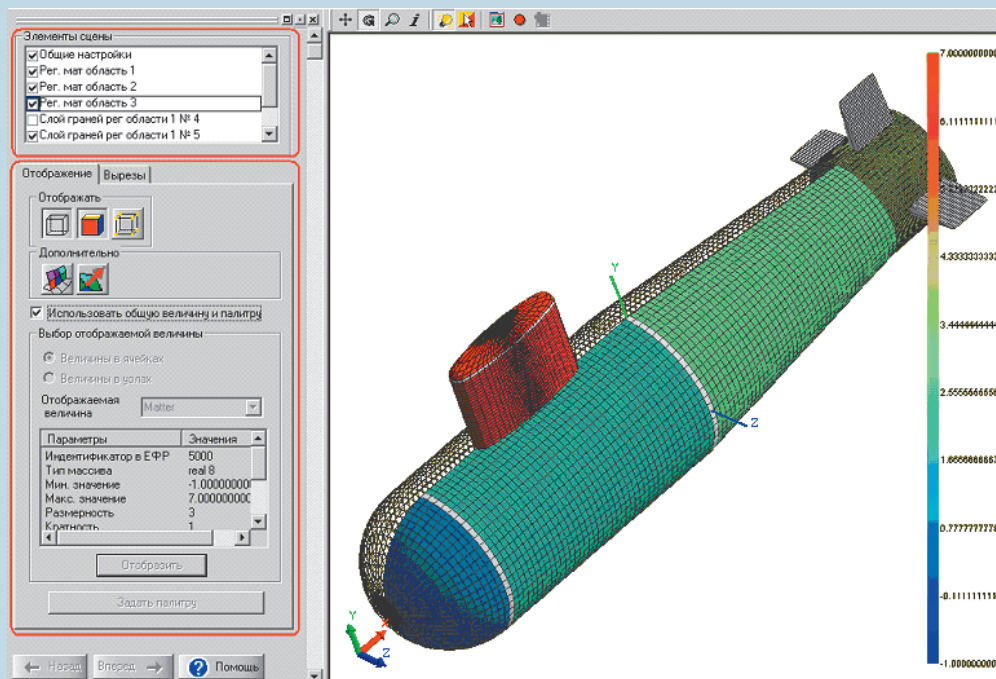


Пример работы с информативно-справочной системой УРС-ОФ

стационарного кинетического уравнения переноса в сферически-симметричной геометрии. Алгоритм в каждой фазовой ячейке и соседних ячейках по радиусу и направлению полета частиц строит поведение монотонизируемой функции на основе поведения решения, найденного

по схеме 1-го порядка точности. Расчеты модельных задач показали качественное превосходство предложенного алгоритма монотонизации по сравнению с широко используемым методом балансного зануления.

Разработаны и реализованы методы решения линейных



Задание информации о параметрах расчета начальных данных

систем алгебраических уравнений в параллельном режиме, ориентированные на многомерную пространственную декомпозицию задач моделирования. Усовершенствованы параллельные алгоритмы предобуславливания на базе неполного LU-разложения и перенумерации неизвестных. Все эти методы интегрированы в единую библиотеку PMLP/Parsol, которая пополнена естественным для параллельных прикладных программных комплексов интерфейсом, повышающим удобство пользования.

Завершен важный этап в работах по созданию единых для всех методик и программных комплексов средств графического задания начальных данных для расчетов. Разработана и сдана в эксплуатацию первая версия программы 3D-РНД для расчета начальных данных трехмерных задач математической физики. При задании начальных данных необходимо пройти ряд этапов: задать геометрию рассматриваемой системы, информацию о физических свойствах веществ, выбрать тип и параметры пространственной сетки, рассчитать распределение веществ и других величин по сетке.

В программе 3D-РНД реализован интерфейс импорта данных о геометрии из современных пакетов геометрического моделирования. Такой подход позволяет пользователям самим проводить задание геометрии в одном из таких пакетов, а также использовать данные, получаемые из конструкторских бюро.

Этапы задания информации о свойствах веществ, типе и свойствах трехмерной сетки, параметрах расчета начальных данных и особенностях конкретного прикладного комплекса, для которого рассчитываются данные, реализованы в программе 3D-РНД в виде графического интерфейса, в котором пользователь не только задает информацию, но и интерактивно контролирует

правильность результатов расчета. В зависимости от объема рассчитываемых данных расчет сетки и распределения вещества по сетке может вестись как в последовательном режиме на ПЭВМ, так и в параллельном режиме на многопроцессорном кластере.

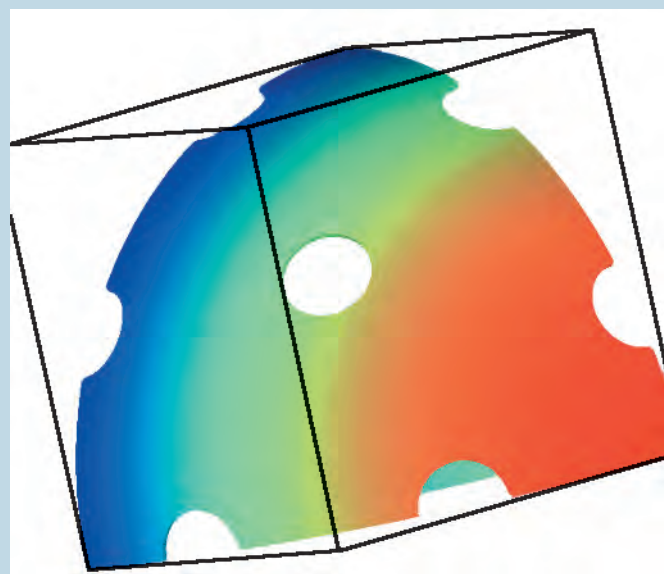
На сегодняшний день в программе 3D-РНД учтено и реализовано большинство требований прикладных комплексов, проводящих расчеты на регулярной трехмерной сетке. Ведется разработка алгоритмов построения нерегулярных сеток и расчетов начальных данных на них.

С использованием усовершенствованных физико-математических моделей, численных методов и программных комплексов получены новые расчетно-теоретические результаты.

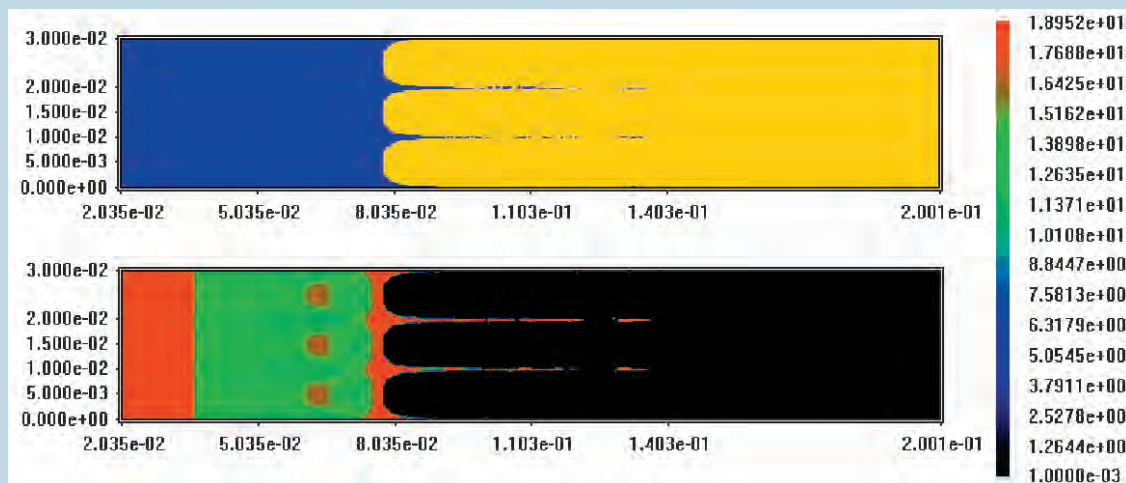
Проведено исследование оптических свойств лазерной плазмы, образующейся при облучении сферических лазерных мишеней. Описаны результаты исследования спектральных характеристик излучения светящегося плазменного образования (СПО), возникающего за фронтом ударной волны, распространяющейся в фоновом газе

с давлением 1 торр при лазерном облучении сферической мишени из органики на стенде МКВ-4 установки «Искра-5». Результаты эксперимента сравниваются с расчетами, проведенными с помощью методики СНДП. Эта методика помимо газодинамики и переноса излучения использует модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и учитывает неравновесные эффекты при расчетах как уравнения состояния, так и спектральных коэффициентов.

В опытах на установке МКВ-4 расчетно исследованы оптические свойства неравновесной плазмы. С помощью методики СНДП, включающей  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, проведено исследование параметров светящихся плазменных образований, возникающих за фронтом ударной волны, распространяющейся в фоновом газе с давлением  $p_0 = 6$  торр, при лазерном облучении с использованием более мощного, чем в предыдущих исследованиях, лазерного импульса и полых сферических мишеней. Результаты расчетов сравниваются с измерениями в опытах.



*Построение расчетной сетки и задание начальных данных в пакете 3D-РНД для трехмерных задач математической физики*



Типичная форма струйного развития неустойчивости на свободной искривленной поверхности конденсированного материала (расчет)

Дальнейшее развитие получил разработанный в ИТМФ комплекс программ НИМФА для решения трехмерных задач миграции подземных вод и распространения растворимых загрязнений в подземных водах от типовых локальных источников. Комплекс активно используется для решения задач

- обеспечения экологической безопасности при взрывных подземных экспериментах;
- прогнозирования последствий аварий в местах хранения радиоактивных отходов;
- экологии.

С использованием комплекса НИМФА проведена комплексная экологическая экспертиза бассейна реки Сатис.

Разработана расчетно-теоретическая модель, описывающая начальную стадию развития неустойчивости на искривленной свободной поверхности конденсированного материала при выходе на эту поверхность ударной волны.

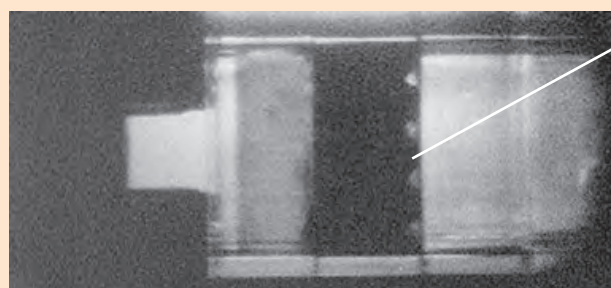
Установлено, что процесс роста неустойчивости при определенных условиях имеет кумулятивный характер, отличный от классической неустойчивости Рихтмайера — Мешкова. Свойства образующихся со свободной поверхности струй зависят от геометрии первоначальных

возмущений и реологических свойств материала. Получены основные закономерности, описывающие динамику роста такой кумулятивной неустойчивости в зависимости от начальных условий и свойств материала.

Ранее в экспериментах на образцах из алюминиевого сплава была показана возможность струйного развития неустойчивости на границе. Недавно совместно с ИФВ проведена новая

серия экспериментов, в которых подтверждаются некоторые результаты построенной теории развития кумулятивной неустойчивости со свободной поверхности конденсированных тел.

Рост производительности и памяти вычислительных комплексов позволил существенно продвинуться в работе по прямому численному моделированию турбулентного перемешивания. Задача о формировании турбу-



Начальная форма искривленной свободной поверхности



Струи

Типичная форма струйного развития неустойчивости на свободной искривленной поверхности конденсированного материала после выхода на эту поверхность ударной волны (эксперимент ИФВ)

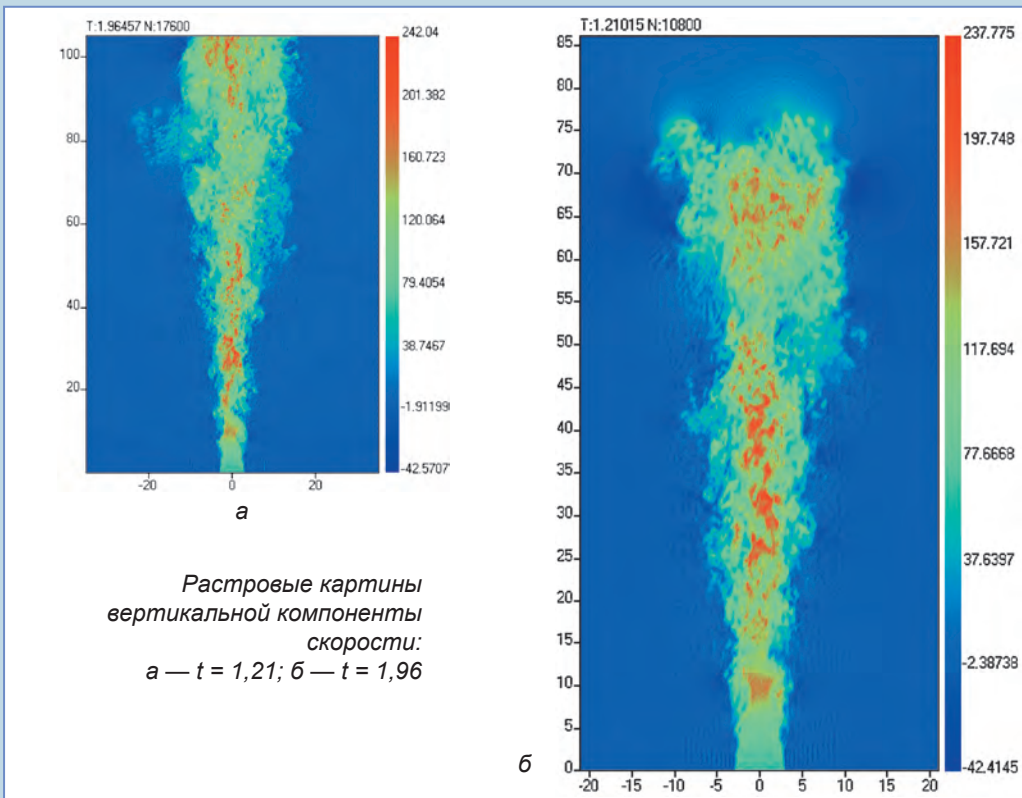
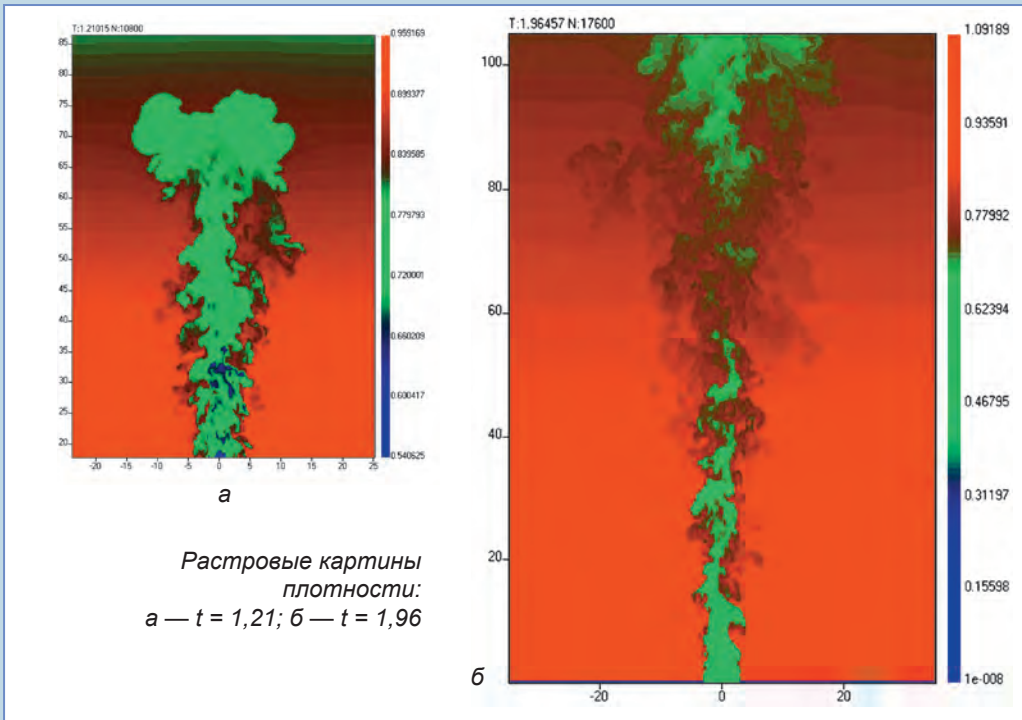


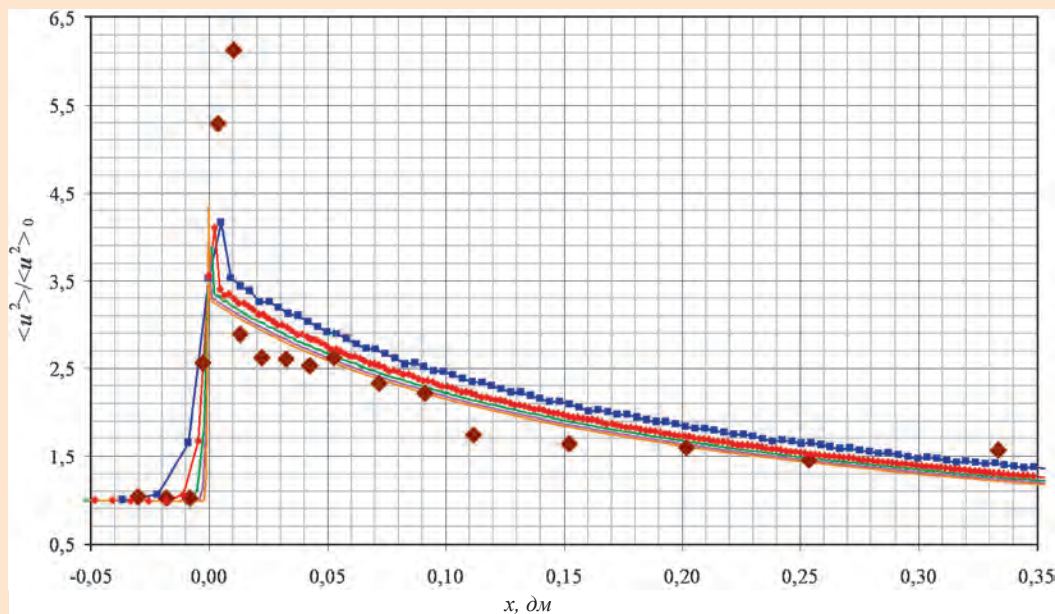
лентной плавучей струи связана как с естественными точечными тепловыми источниками, так и с промышленными, возникающими, в частности, в результате аварийных ситуаций. Проведе-

но прямое 3D численное моделирование развития такой струи от стационарного источника.

Для прямого численного моделирования турбулентности на основе разностного решения

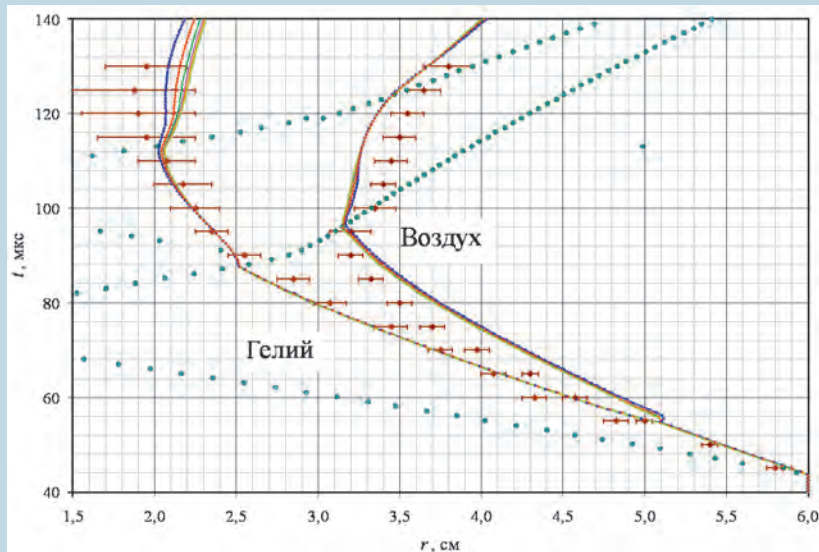
трехмерных уравнений Навье — Стокса требуются чрезвычайно большие объемы памяти и быстродействие ЭВМ. По этой причине для ее описания используются полуэмпирические





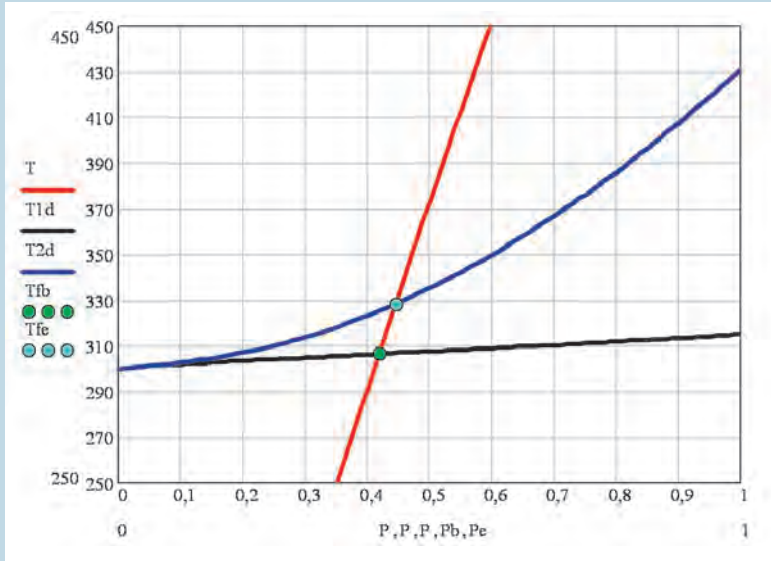
Изменение среднего квадрата продольных пульсаций скорости при взаимодействии изотропной турбулентности и стационарной ударной волны; расчеты на сходимость по модифицированному варианту модели Никифорова:  $\blacklozenge$  — Барр и др. 1996 г. Расчеты по программе ВИХРЬ:  $\blacksquare$  — сетка 200;  $\blacklozenge$  — сетка 400;  $\blacklozenge$  — сетка 800;  $\blacklozenge$  — сетка 1600;  $\blacklozenge$  — сетка 3200

модели. Во ВНИИЭФ широкое признание получила одномерная модель В. В. Никифорова. В настоящее время разработана модификация модели, в которой физически адекватно описывается взаимодействие ударной волны и турбулентности без явного выделения фронта ударной волны. Для инициализации счета модельных уравнений предложен алгоритм, основанный на анализе поведения малых возмущений контактных границ и позволяющий полностью автоматизировать процесс расчета турбулентных течений. Эффективность модификации иллюстрируют результаты моделирования опыта, в котором исследовалось взаимодействие изотропной турбулентности и стационарной ударной волны интенсивностью  $M = 2,8$  с измерением мгновенных значений скорости течения, и опыта, в котором исследовалось развитие зоны перемешивания на цилиндрической границе гелий-воздух, ускоряемой сходящейся цилиндрической ударной волной. В расчетах получены сходимость



Развитие зоны турбулентного перемешивания на цилиндрической границе разноплотных газов, ускоряемой сходящейся ударной волной; расчеты на сходимость по модифицированному варианту модели Никифорова (параметры начального возмущения:  $a_0 = 75$  мкм и  $k = 34$  см $^{-1}$ ):

- $\blacklozenge$  — Андронов, Мешков и др., 1982 г. Расчеты по программе ВИХРЬ:
- $\bullet$  — ударная волна,
- $\blacksquare$  — сетка 126+148+64;
- $\blacklozenge$  — сетка 252+296+128;
- $\blacklozenge$  — сетка 504+592+256;
- $\blacklozenge$  — сетка 1008+1184+512;
- $\blacklozenge$  — сетка 2016+2368+1024;
- $\blacklozenge$  — сетка 4032+4736+2048



Кривая фазового равновесия  $T(P)$ , зависимости температуры от давления на ударных адиабатах ПММА для первого  $T1d$  и второго  $T2d$  фазовых состояний.

Нижняя точка — точка начала фазового превращения, верхняя точка — конечная точка фазового превращения.

$$[T] = K, [P] = \text{ГПа}, q_0 = -0,2 \text{ кДж/г}$$

разностного решения и вполне удовлетворительное согласие с экспериментом с точностью в пределах погрешности измерений. Ведется работа над реализацией двумерной версии модели Никифорова.

При применении уравнений состояния в форме Ми — Грюнайна построена линия равновесия для двух фазовых состояний ПММА. Вычислена удельная теплота  $q(P)$  и полная теплота  $Q(\alpha)$  фазового превращения.

Трактовка фазового превращения как процесса вязкого трения и введение эффективной второй вязкости, моделирующей фазовое превращение, позволили обосновать возможность снижения плотности в области фазового превращения на фронте ударной волны без нарушения требований со стороны законов сохранения потоков массы и импульса.

За последнее десятилетие в России и в мире наблюдается значительный интерес к получению материалов с помощью различных методов интенсивной пластической деформации

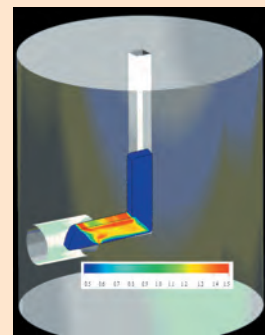
(ИПД), когда интенсивность деформации достигается с помощью высокого всестороннего давления. Посредством таких методов можно значительно измельчить микроструктуру металлов и сплавов до наноразмеров, когда средний размер зерна будет измеряться десятками нанометров. Объемные наноструктурированные материалы,

полученные методами ИПД, характеризуются уникальным комплексом физико-механических свойств:

- высокой прочностью при сохранении достаточной пластичности;
- высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичностью;
- измененными модулем упругости, температурой Дебая и Кюри;
- аномальной диффузионной активностью;
- рекордными магнитными свойствами.

Интерес к подобным материалам от чисто научного уже перешел в область практического применения. В медицине наноструктурированный чистый титан получил широкое применение для изготовления различных имплантатов. Наряду с оптимальным соотношением прочностных характеристик, он имеет и максимальную биологическую совместимость. Сейчас наноструктурированные материалы находят применение в машиностроении, авиастроении и т. д.

Совместными усилиями специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ, других российских центров и американских (Лос-Аламос) ученых созданы эксперименталь-



Устройство для создания интенсивной пластической деформации

ные установки для получения материалов с уникальными характеристиками, и разработаны методики, позволяющие моделировать процесс ИПД.

Во ВНИИЭФ разработан метод определения реакции ВВ на аварийные тепловые воздействия с помощью численного моделирования, основанный на последовательном анализе двух стадий: 1) от начала нагрева до воспламенения; 2) развитие горения и переход во взрыв.

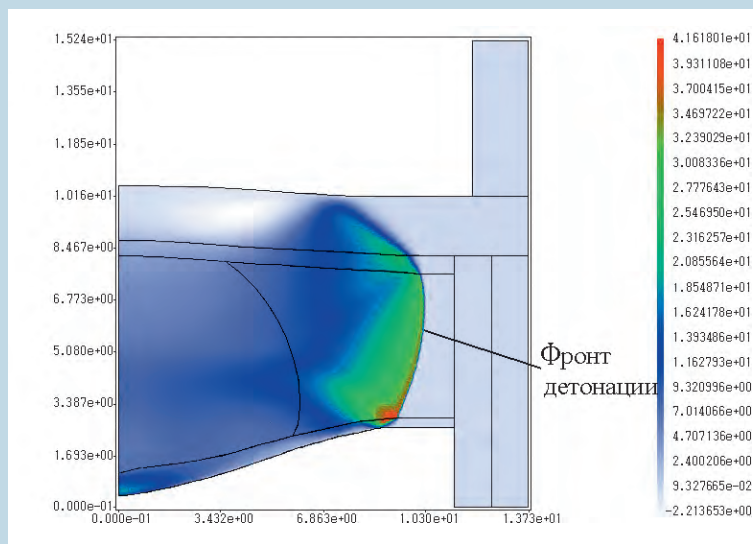
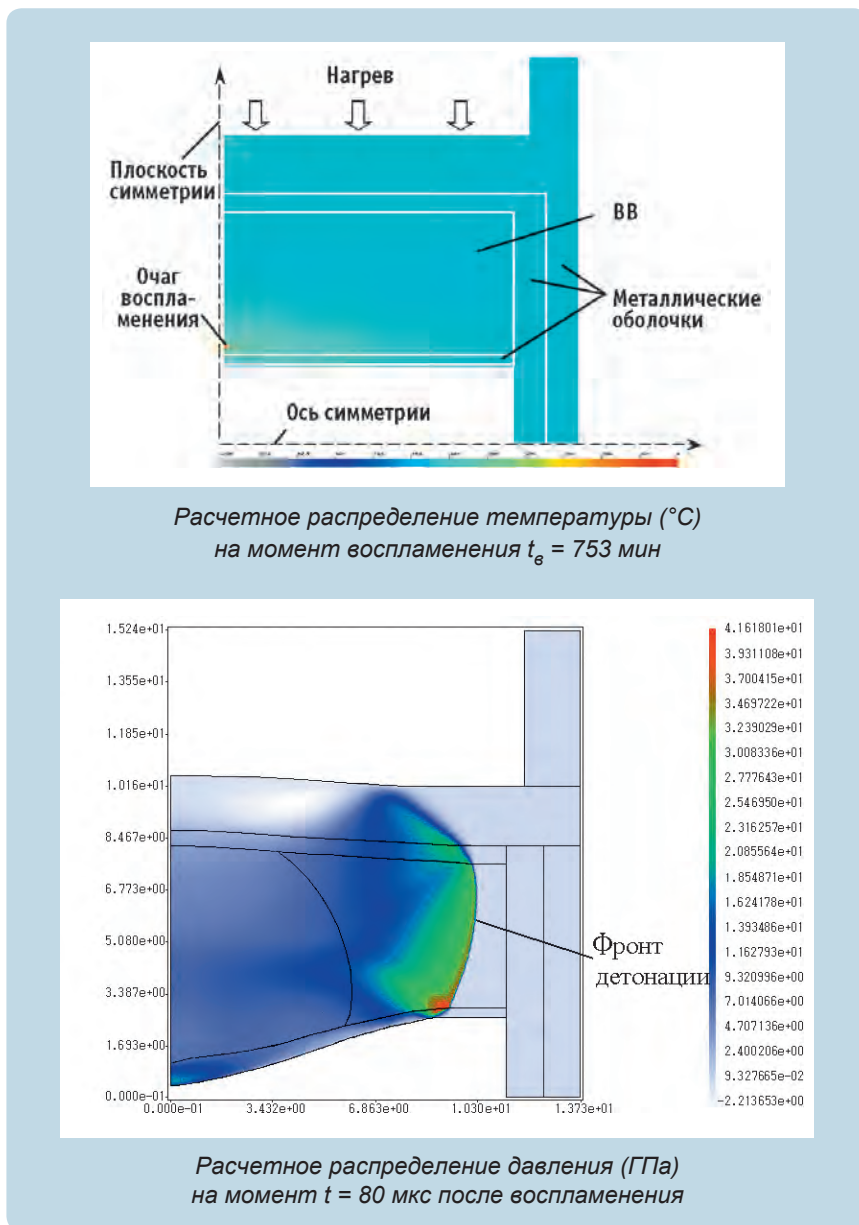
Для анализа первой стадии используются разработанные во ВНИИЭФ компьютерные программы, позволяющие проводить сквозные расчеты нагрева и воспламенения ВВ в составе сложной конструкции в двумерной и трехмерной геометрии с учетом следующих физических процессов:

- теплопроводности в материалах конструкции;
- лучистой и конвективной теплопередачи в полостях конструкции;
- химической кинетики в областях с ВВ (одностадийной и многостадийной).
- фазовых переходов (плавление) элементов конструкции;
- «вспучивания» теплозащитных покрытий.

На этой стадии определяются время задержки воспламенения, расположение очага, а также поля температуры и концентрации ВВ на момент воспламенения.

В случае, если ВВ воспламеняется, исследуется вторая стадия. При этом результаты расчета первой стадии используются как исходные данные. Анализ второй стадии проводится с помощью разработанной во ВНИИЭФ двумерной газодинамической компьютерной программы, в которую встроена модель перехода горения в детонацию (ПГД).

Рассчитана задача о тепловом инициировании ВВ LX-10 массой ~ 7 кг в сборке в форме полого цилиндра, нагреваемой с наружной боковой поверхности, применительно к описанию экс-



периментов с тепловым взрывом (см. рисунок).

В отличие от большинства подходов заложенная в данный метод идея рассмотрения цепочки связанных физических процессов позволяет прогнозировать максимально возможный спектр откликов ВВ на второй стадии: от детонации до спокойного сгорания без взрыва.

Для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния элементов сложных пространственных конструкций с учетом нелинейного поведения материала и контактного взаимодействия при интенсивных механических и

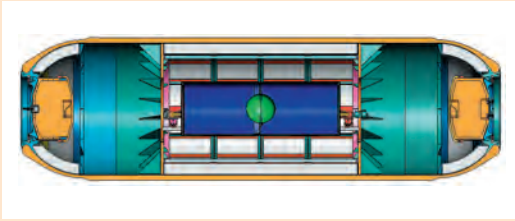
тепловых нагрузениях в двух- и трехмерной постановках создан программный комплекс ДРАКОН.

С использованием комплекса, решены практические задачи

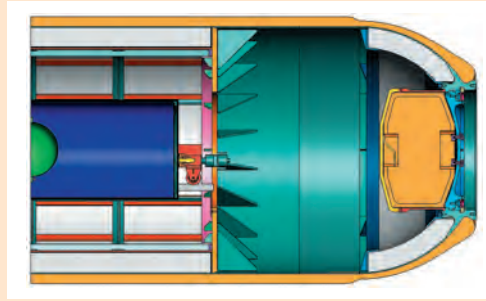
— расчета реакции взрывостойкого металлокомпозитного контейнера АТ595;

— моделирования пробития составной преграды высокоскоростным ударником;

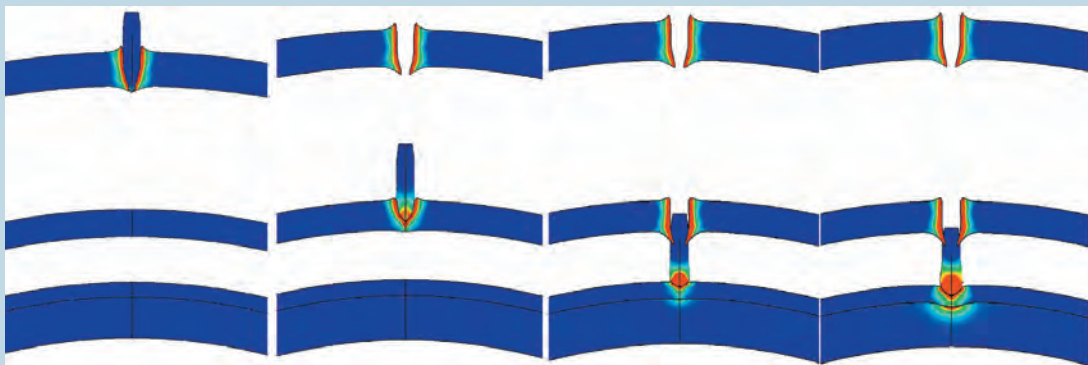
— моделирования разрушения цилиндрической трубы при взрывном нагружении.



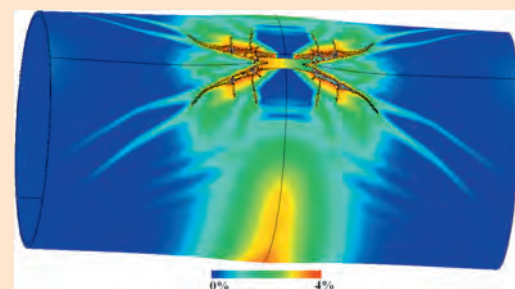
Конструкция контейнера АТ595



Расчетные и экспериментальные данные по деформации на наружной поверхности корпуса контейнера при взрыве заряда ВВ 8 кг ТНТ в инертной упаковке массой 36 кг



Положение составной преграды и ударника на различные моменты времени



Конечное состояние цилиндрической трубы в эксперименте и расчете

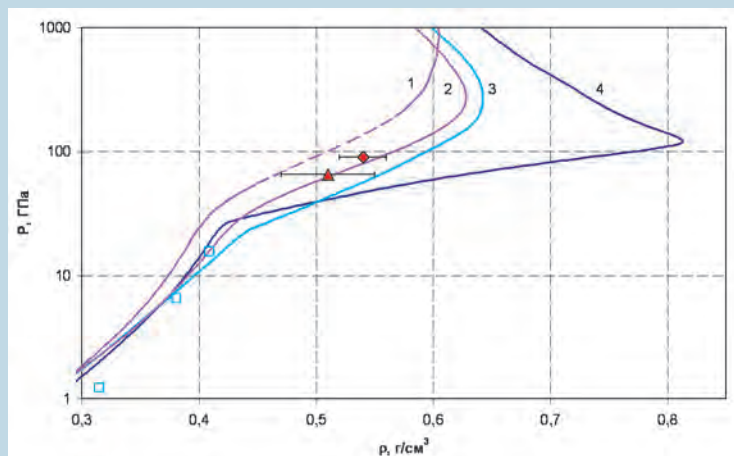
## ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Впервые получены экспериментальные данные по ударно-волновой сжимаемости и температуре газообразного гелия высокой начальной плотности при давлениях 65 и 90 ГПа. Плотность гелия составила 0,51 и 0,54 г/см<sup>3</sup>, а температура — 27230 и 51000 К соответственно. В экспериментах использовался газ с начальным давлением  $P_0 = 1120$  атм и плотностью  $\rho_0 = 0,124$  г/см<sup>3</sup>, равной плотности жидкого гелия. Скорость ударной волны и температура ударно-сжатого газообразного гелия измерялись оптическим методом с использованием кварцполимерных световодов.

Излучение фронта ударной волны в гелии регистрировалось высокоскоростным 5-канальным пирометром и фотодиодными приемниками на осциллографах типа Agilent и Tetratics.

Экспериментально и теоретически исследованы термодинамические свойства диоксида урана в волнах ударного сжатия и квазиизэнтропического расширения. Исследования представляют интерес для прогнозирования особенностей возможных последствий аварий на объектах современной ядерной энергетики вследствие специфичности теплофизических свойств диоксида урана.

На основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса для простых и многокомпонентных смесевых веществ построено широкодиапазонное уравнение состояния жидкого и газообразного диоксида урана с учетом испарения и химического разложения на компоненты: O, O<sub>2</sub>, U, UO, UO<sub>2</sub>, UO<sub>3</sub>. Относительно простое уравнение состояния согласуется с имеющимися высокотемпературными экспериментальными данными для относительно низких давлений жидкости и пара, а также с данными по ударному сжатию

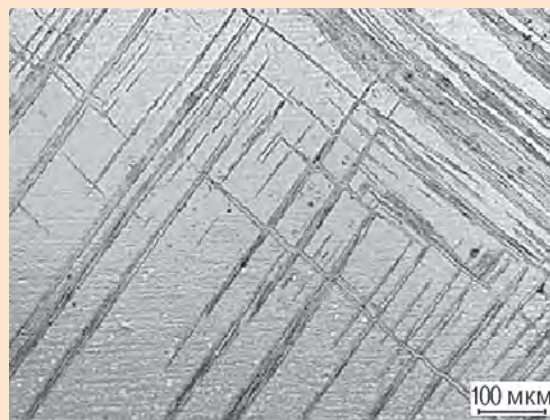


Ударная адиабата гелия:  
 эксперимент: □ — жидкий гелий (Ливермор);  
 ▲, ◆ — газообразный гелий (ВНИИЭФ);  
 расчет: 1, 2 — варианты УРС ВНИИЭФ;  
 3, 4 — варианты УРС SESAME

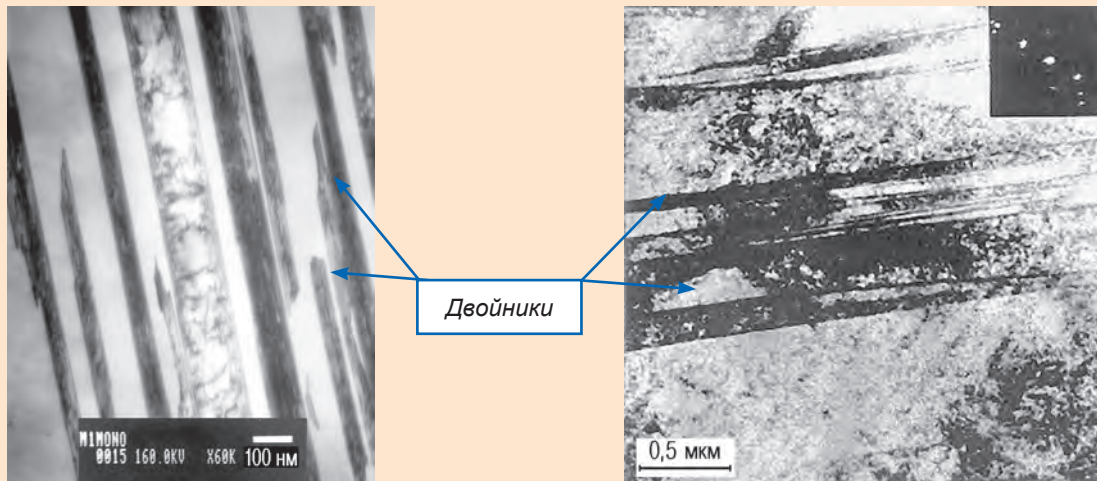
диоксида урана до давлений ~ 100 ГПа.

Развитие гетерогенной структуры деформации в зернах металлов при высокоскоростном деформировании ( $\dot{\epsilon} > 10^7$  с<sup>-1</sup>) в последние годы исследуется достаточно интенсивно. Установлено сильное влияние гетерогенных структур на динамическую прочность, исследованы условия зарождения гетерогенной структуры и ее зависимость от параметров нагружения.

В 2005 году ВНИИЭФ совместно с Институтом проблем сверхпрочности (ИПСН-РАН, г. Уфа) и Ливерморской лабораторией провел исследования внутренней структуры полос локализованного сдвига с использованием электронных просвечивающих микроскопов. Оказалось, что внутренняя структура полос представляет собой множество (до 100) двойников толщиной ~0,1–0,2 мкм, ориентированных в одной плоскости.



Гетерогенная структура деформации, видимая в оптический микроскоп



Полосы сдвига, полученные на просвечивающем электронном микроскопе

Область, прилегающая непосредственно к двойникам, содержит большое количество дислокаций, а также следы рекристаллизации, связанные, по-видимому, с тепловым разогревом при формировании двойниковых пакетов.

Полученные результаты послужат дальнейшему развитию моделей деформирования металлов в области высоких давлений ( $\sigma_x > 20$  ГПа) и скоростей деформации  $\dot{\epsilon} > 10^6$  с<sup>-1</sup>.

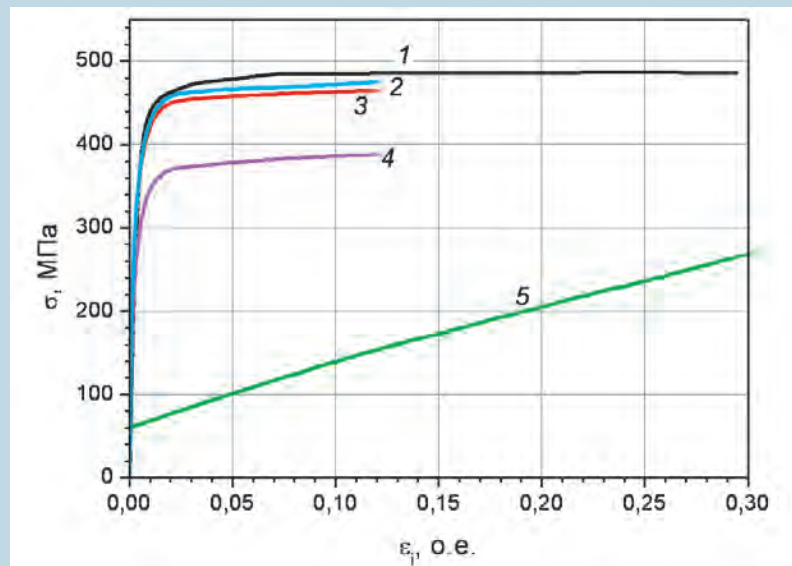
Нанодисперсные и микрокристаллические модификации материалов, обладая чрезвычайно высокой прочностью при достаточно высокой пластичности, представляют большой интерес и могут найти применение в различных областях промышленности.

Другим способом повышения прочности является ударно-волновое упрочнение. В течение 2005 года ИФВ совместно с НИО-07 и ИПСН-РАН исследовали статические и динамические свойства ультрадисперсной ( $d \leq 0,5$  мкм) меди и меди, подверженной предварительному ударному нагружению до давлений от 30 до 70 ГПа. Установлено, что ударно-волновое нагружение может повышать прочность обычной меди М1 ( $d \approx 100$  мкм) до уровня,

достижимого для ультрадисперсного состояния,  $\sigma_{0,2} = 420$  МПа.

Особенно эффективно воздействие нескольких ударных волн с амплитудой  $\sigma_x \approx 30-40$  ГПа, а также ударных волн с предварительным охлаждением образца (до  $-190$  °С). При высо-

кой скорости деформирования  $\dot{\epsilon} \sim 10^5$  с<sup>-1</sup> (тест Тейлора) прочность ударно-нагруженной меди  $\bar{Y}_d \approx 0,58$  ГПа оказалась даже на 15 % выше, чем ультрадисперсной ( $\bar{Y}_d \approx 0,51$  ГПа). Ударно-волновое упрочнение, по-видимому, связано



$\sigma$ - $\epsilon$  диаграммы сжатия различных модификаций меди при  $\dot{\epsilon}_i = 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>: 1 — ультрадисперсная медь в исходном состоянии; 2 — крупнокристаллическая медь в исходном состоянии; 3 — медь, нагруженная двумя ударными волнами (40, 35 ГПа); 4 — медь после однократного ударно-волнового нагружения до давления 30 ГПа; 5 — медь после однократного ударно-волнового нагружения до давления 30 ГПа с охлаждением образцов до температуры жидкого азота

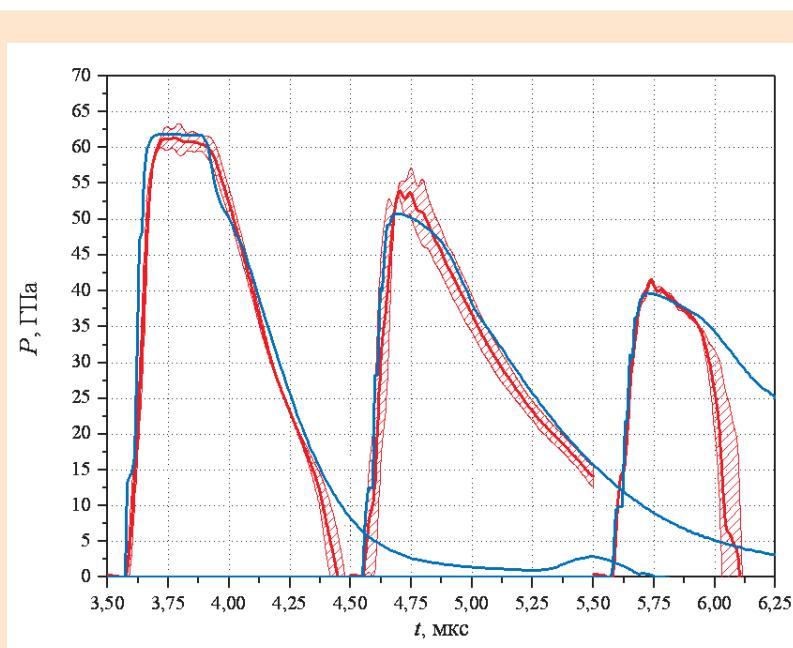
с образованием большого количества двойников, препятствующих движению дислокаций.

В 2005 году завершено усовершенствование методики измерения волн сжатия мanganin-выми датчиками. Новая методика позволяет измерять давления до 68 ГПа, что в  $\sim 2$  раза выше по сравнению с ранее используемой методикой. Погрешность измерения давления после калибровки не превышает 2 %.

С помощью новой методики измерено распространение ударной волны по образцу из стали 12X18H10T, применяемой в полигонных исследованиях для изготовления капсул. Измерения проведены с целью отработки модели динамической прочности стали.

Применение в расчетах релаксационной модели упругопластического деформирования с функциональной зависимостью стационарного предела текучести от параметров напряженно-деформированного состояния позволило описать экспериментальные результаты, что свидетельствует о вязкоупругопластическом поведении реальных материалов в условиях интенсивных динамических нагрузок. Согласно результатам расчетно-теоретического анализа максимальная динамическая прочность стали марки 12X18H10T при  $\sigma_x \approx 62$  ГПа составляет  $Y_d \approx 3,5$  ГПа.

Лазерным интерферометрическим методом Фабри — Перо с

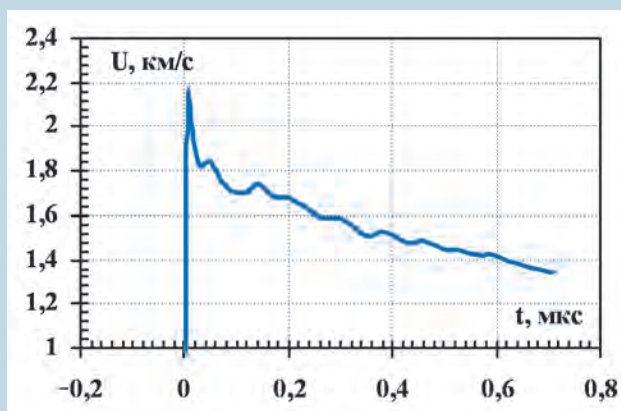
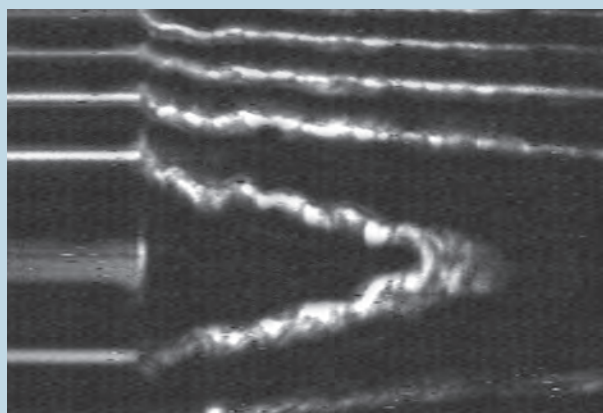


Экспериментальные и расчетные профили  $\sigma_x(t)$  затухания УВ в стали 12X18H10T:  
— эксперимент; — расчет

наносекундным временным разрешением проведены комплексные исследования детонационных характеристик пластизольных ВВ ОЛД-20 и ОЛП-25Т. В опытах регистрировалась массовая скорость границы раздела ВВ-монокристалл LiF и определялись давление детонации, профиль и структура волны. На профиле массовой скорости границы раздела зарегистрированы пульсации, вызванные турбулентностью течения за фронтом детонационной волны

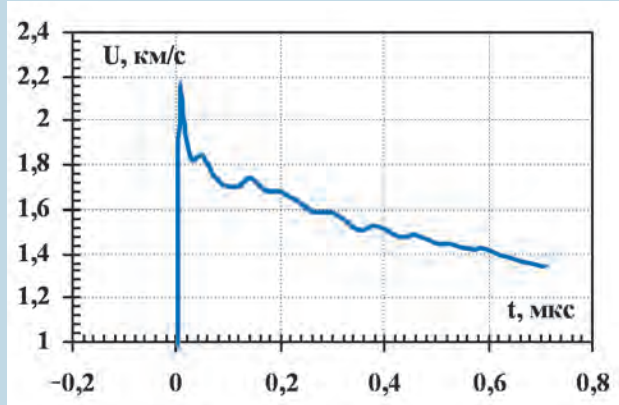
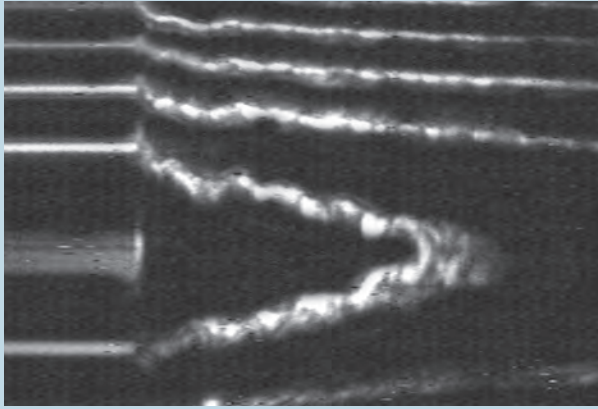
вследствие гетерогенности ВВ (ВВ состоит из нескольких компонентов). Параметры детонации в состоянии Чепмена — Жуге для состава ОЛД-20 составили: давление  $P = 33,2$  ГПа, массовая скорость  $U = 2,15$  км/с; а для ОЛП-25Т —  $P = 25,5$  ГПа,  $U = 1,96$  км/с.

Благодаря малому размеру пятна зондируемой поверхности ( $\sim 0,1$  мм) лазерным интерферометрическим методом Фабри — Перо регистрируется тонкая структура течения за фронтом



Характерная интерферограмма и график скорости границы раздела ОЛД-20-LiF





Характерная интерферограмма и график скорости границы раздела TNT-LiF

детонационной волны, например, в зависимости от типа и структуры исходного ВВ. Так, для тротила (ТНТ) зарегистрирован плавный «классический» вогнутый профиль массовой скорости границы раздела с монокристаллом LiF.

Измерены параметры детонации и химических пиков в штатных ВВ на основе октогена, гексогена, тротила, ТЭНа и жидких взрывчатых растворах на основе нитрометана, тетранитрометана и нитробензола.

В 2005 году разрабатывались взрывные системы и исследовались синхронные и асинхронные множественные воздействия твердых тел на твердые преграды при скорости соударений ~1 км/с. Анализировались экспериментальные и расчетные данные по определению характера разрушения дюралюминиевых преград при воздействии стальных шариков. По-видимому, впервые зафиксировано явление внутреннего откола вблизи сквозных пробоин.

Проведено исследование нового мощного литьевого ВВ ТНАЗ. Показано, что ТНАЗ по мощности существенно превосходит тротил, обладает малой чувствительностью к механическим воздействиям и имеет малую критическую толщину детонирующего слоя. Полученные характеристики свидетельствуют о перспективности



Внутренний откол в дюралюминии при множественном ударе стальных шариков диаметром 5 мм со скоростью 1400 м/с (длина трещины 300 мкм)

применения ТНАЗ в качестве компонента мощных литевых составов для неядерных боеприпасов.

Исследован состав ГАВ (CL-20). Установлено, что ГАВ по мощности существенно (до 15 %) превосходит октоген. По своим основным характеристикам (термическая стойкость, чувствительность) ГАВ близок к октогену и ТЭНу. Показана возможность разработки на основе ГАВ новых мощных взрывчатых составов.

Разработаны и сданы в эксплуатацию измерительно-вы-

числительные комплексы (ИВК) «Газодинамика», «Технолог», «Структура», «Теплофизика», «Чувствительность», «Физхимия». ИВК позволяют автоматизировать процессы регистрации параметров при исследовании свойств ВВ, повысить достоверность и качество получаемой информации, уменьшить трудоемкость ее обработки.

При исследовании высокоскоростного метания к числу важнейших характеристик исследуемых процессов относятся зависимости скорости и ускорения разго-

няемого тела от времени. В том случае, когда разгон ударника происходит в сплошной стальной трубе, непрерывное невозмущающее измерение параметров движения является очень сложной задачей. Тем не менее эти характеристики могут быть измерены с помощью радиоинтерферометров. Вполне достаточная точность измерений может быть получена в миллиметровом диапазоне длин волн.

Эксперименты проводились с использованием высокоскоростного ударного стенда «Ствол-65». Процесс метания ударника регистрировался при помощи радиоинтерферометра с квазиоптической антенно-фидерной системой (АФС), зондирующее излучение поступало на ударник, размещенный в канале ствола установки «Ствол-65», при помощи дополнительного зеркала. Полное расстояние от АФС до поверхности ударника составляло 1,1 м. Метание ударника осуществлялось за счет энергии взрыва заряда ВВ.

В 2005 году закончена разработка программируемого генератора временных интервалов (ГВИП). По своим техническим характеристикам генератор находится на уровне лучших зарубежных аналогов и превосходит все известные разработки в РЯЦ-ВНИИЭФ.

В настоящее время ГВИП интегрирован в состав АСУК перспективного рентгенографического комплекса РГК-М на основе ускорителя «СТРАУС-Р». Управление генератором осуществляется по интерфейсу RS-232. Это позволяет внедрить генератор в любую вновь разрабатываемую АСУК. Возможно управление генератором от персонального компьютера на расстоянии до 2000 м с помощью дополнительных покупных модулей. Программное обеспечение ГВИП позволяет контролировать работоспособность генератора. Квалифицированный оператор может установить необходимые

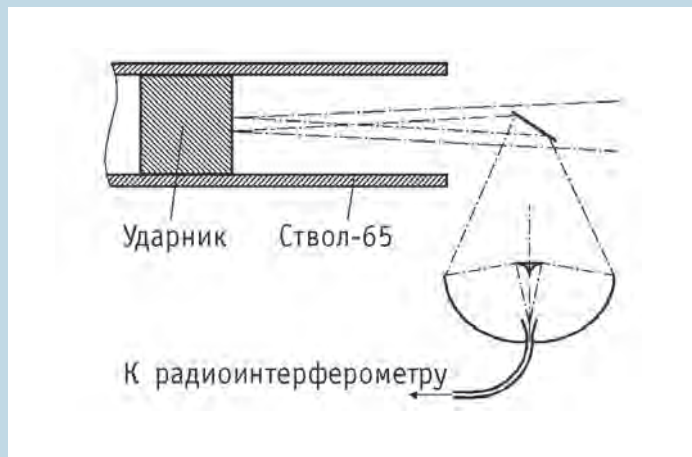
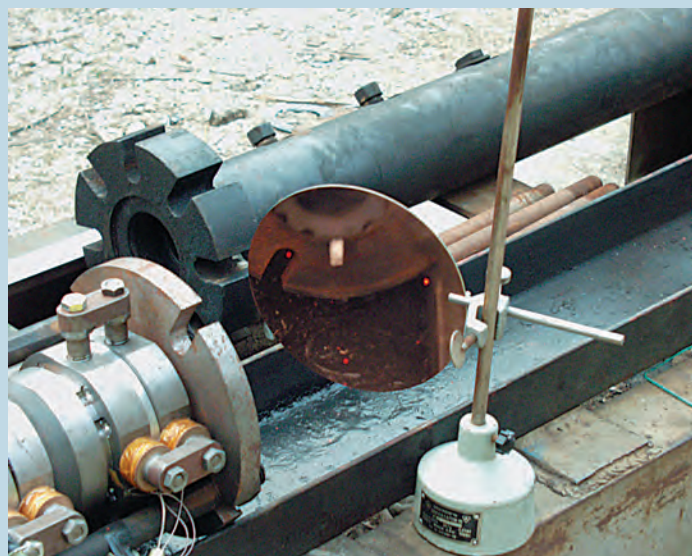
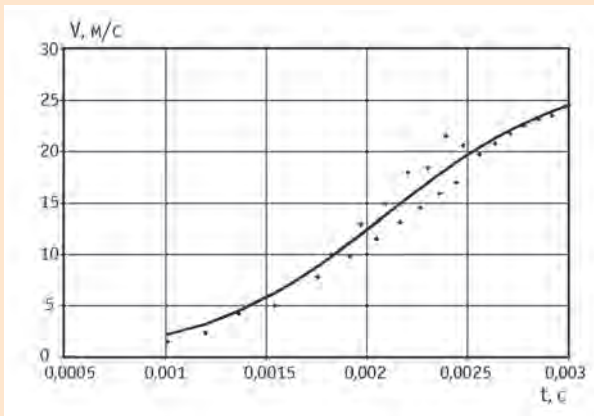


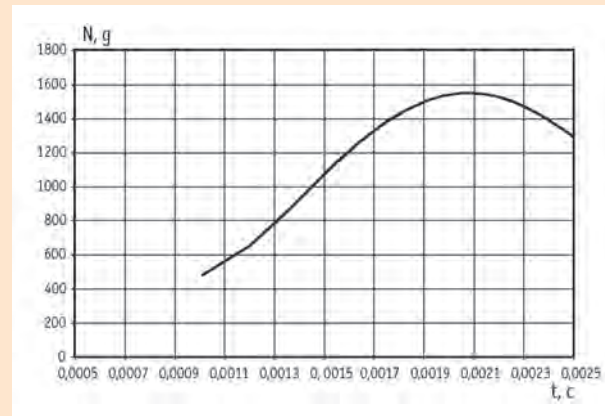
Схема проведения опытов по измерению скорости ударника



Экспериментальная установка



Зависимость скорости движения ударника от времени



Аппроксимированная зависимость перегрузки ударника

длительности задержки каждого из восьми выходных каналов, выбрать любой из четырех каналов запуска, проконтролировать прохождение запускающих сигналов чтением регистра состояния.

В конструкцию прибора заложен модульный принцип построения, использована современная зарубежная элементная база (ПЛИС, микропроцессоры).

ГВИП предназначен для создания многоканальных систем синхронизации в сложных электрофизических установках.

В ИФВ налажено мелкосерийное производство этих приборов.

Лабораторный баллистический комплекс БУТ-76 ИФВ является инструментом, используемым для динамического

нагружения образцов пластинами-ударниками, имеющими скорость до 700 м/с. При этом в образцах реализуются давления до 10 ГПа с длительностью импульса от 0,5 до 10 мкс. В 2005 году на базе установки БУТ-76 создан новый лабораторный оптический комплекс, позволяющий за счет высокого временного разрешения  $\sim 5$  нс проводить

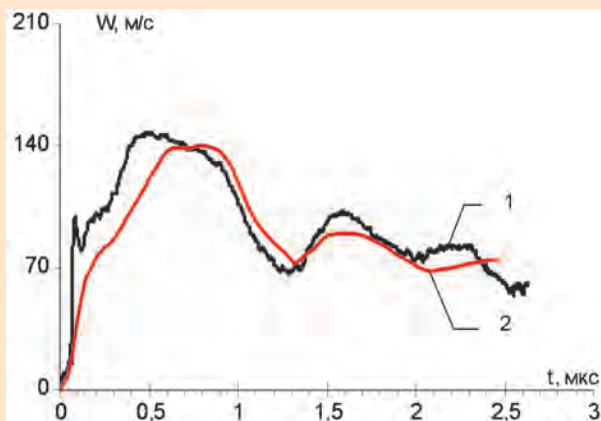
### Технические характеристики ГВИП

Количество независимых модулей задержки и внешних сигналов запуска	4
Количество выходных импульсов в каждом модуле	2
Возможность программируемого запуска каждого модуля от любого из четырех входных сигналов запуска	
Диапазон программирования временного интервала	от 0 до 39,999995 мс
— погрешность временного интервала определяется следующим выражением:	$\pm(2 \times 10^9 + 2 \times 10^{-6} \times T_{\text{зад}}) \text{ с}$
— шаг изменения временного интервала	5 нс
Хранение данных	энергонезависимое
Связь по входным и выходным сигналам	волоконно-оптическая
— входная оптическая мощность	не менее $-20$ дБм (0,01 мВт)
— выходная оптическая мощность	не менее $-15$ дБм (0,03 мВт)
— тип кабеля	оптоволоконный с диаметром волокна 62,5 или 125 мкм, разъем типа ST
Напряжение питания	24 В
Потребляемая мощность	не более 3,5 Вт
Конструктивное исполнение	функциональный модуль, размещаемый в приборной стойке типа «С19»
Типоразмер	141,9 × 128,4 × 167
Диапазон рабочих температур	0–50 °С
Управление от PC	по интерфейсу RS-232

исследования ударно-волнового деформирования материалов на качественно новом уровне по сравнению, например, с ранее используемым методом емкостного датчика. Модификация созданного на установке БУТ-76 интерферометра позволит создать в ИФВ малогабаритный транспортабельный лазерный комплекс с перспективой его использования на внутренних и внешних полигонах.

Для исследования физики глубоководного взрыва и моделирования воздействия взрыва на элементы конструкций подводного вооружения ВМФ разработана камера высокого давления (КВД) диаметром 1600 мм, рассчитанная на рабочее давление 15 МПа. КВД оснащена технологическими коммуникациями для подачи воды и сжатого воздуха, датчиками статического давления, гермоводами для измерительных линий. КВД имеет систему регистрации реакции корпуса на взрывное воздействие и систему регистрации параметров воздействия подводной ударной волны на объект испытания. Проведены первые исследования по эффективности действия перспективных взрывчатых составов в глубоководных условиях.

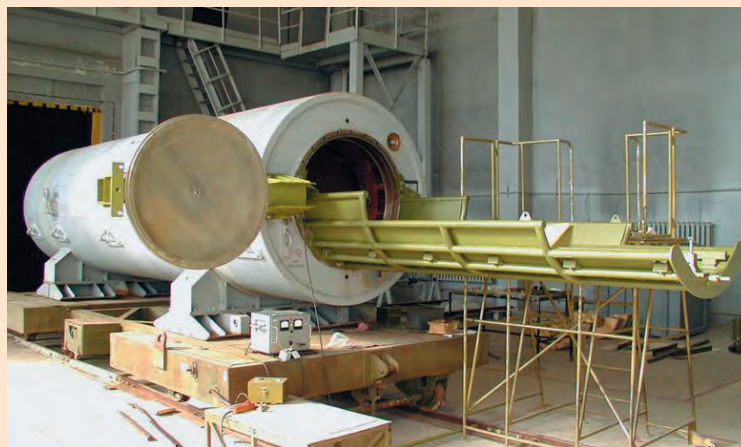
Передан на оснащение Аварийно-технического центра (АТЦ) ВНИИЭФ взрывостойкий контейнер АТ 601. Основное назначение контейнера — обеспечение экологической безопасности при устранении последствий аварии со спецприборами за счет полной локализации внутри полости контейнера продуктов вероятного взрыва мощностью не более 60 кг ТНТ. Контейнер может применяться для транспортировки, временного хранения, дистанционной разборки или ликвидации аварийных спецприборов.



Профили скорости свободной поверхности стальных образцов толщиной 4 мм:  
1 — регистрация с помощью интерферометра;  
2 — регистрация с помощью емкостного датчика



Камера высокого давления



Контейнер с пристыкованным загрузочным устройством

# ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

Разработан малогабаритный импульсно-периодический кислородно-йодный лазер (ИП-КИЛ) с объемом активной зоны  $50 \times 50 \times 250$  мм.

Исследованы зависимости энергии излучения лазера в единичном импульсе от расхода хлора и соотношения активных и буферных веществ в лазерном объеме (кислород, остаточный хлор, азот, гелий, метилиодид), а также электрической энергии, вкладываемой в среду.

## Параметры излучения лазера при расходе хлора 65–80 ммоль/с

Средняя энергия излучения в импульсе	1,0 Дж
Среднеквадратичное отклонение энергии в единичных импульсах от среднего значения энергии в серии импульсов	$\pm (3-5)\%$
Максимальный удельный энергопотребление в рабочей среде	1,7 Дж/л
Частота повторения импульсов	до 20 Гц
Длительность импульса генерации (по полувысоте)	10–30 мкс
КПД (отношение энергии излучения к вложенной в среду электрической энергии)	60–70 %

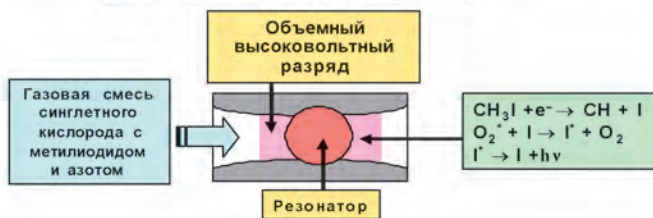
## Экспериментальный макет импульсно-периодического кислородно-йодного лазера

Разрядная камера



Лазерный объем  $V=0,6$  л, резонатор

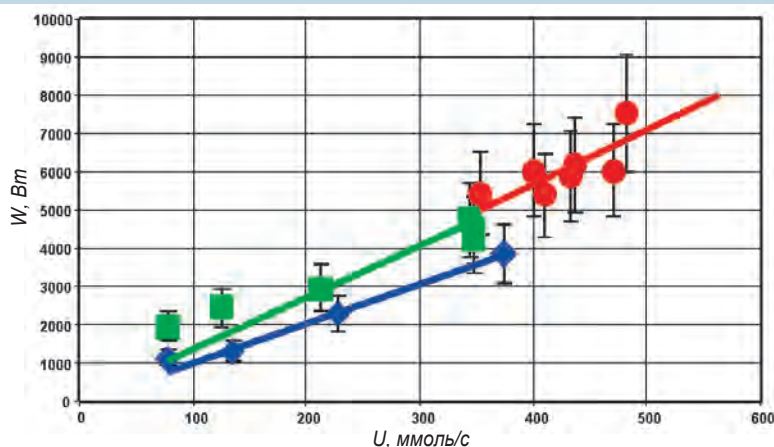
Генератор синглетного кислорода



Отработан модуль генератора синглетного кислорода с закрученным потоком газа (ЗГСК); продемонстрирована устойчивая работа реактора при расходе хлора до 560 ммоль/с, рабочего раствора 1,2 л/с, давлении газа до 120 торр, скорости газа  $\sim 120$  м/с, выходе синглетного кислорода более 90 % и степени выработки хлора  $\sim 87$  %.

Проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик сверхзвукового КИЛ совместно с модулем ЗГСК стенда КИЛ-10. Использовались плоские сопла с высотой критического сечения 8, 10 и 12 мм при давлении газа на входе в сопло до 90 торр. В экспериментах при расходе хлора  $\sim 480$  ммоль/с, скорости газа в реакторе  $\sim 120$  м/с и давлении газа на входе в сопло  $\sim 90$  торр максимальная мощность генерации КИЛ составила  $\sim 8$  кВт, что отвечает приведенной мощности излучения  $\sim 240$  Вт/см<sup>2</sup>.

Проведены исследования абсолютной концентрации, выхода и энергетической эффективности наработки синглетного кислорода в движущемся СВЧ-разряде в чистом кислороде и его смесях с гелием при парциальном давлении кислорода от 3 до 15 торр с использованием окиси ртути для удаления атомарного кислорода из газового потока. Для



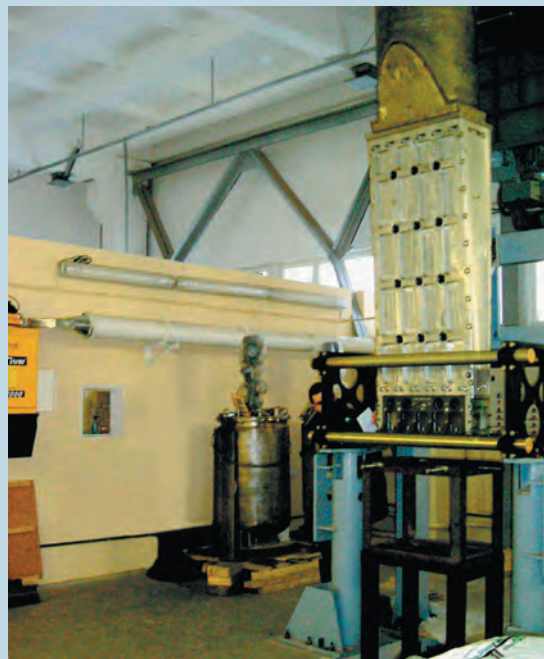
Зависимость полной мощности генерации от расхода хлора при различных значениях критического сечения сопла:

◆ —  $h = 8$  мм; ■ —  $h = 10$  мм; ● —  $h = 12$  мм

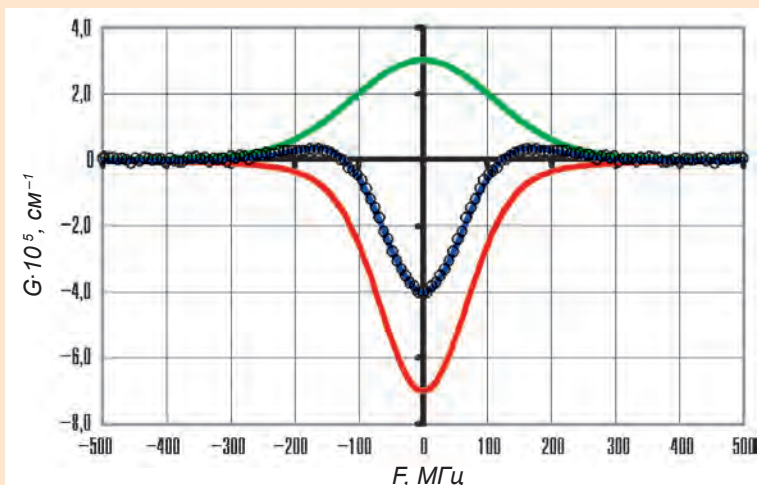
смеси  $O_2:He = 1:1$  при полном давлении 6 торр получена максимальная абсолютная концентрация синглетного кислорода  $\sim 1,15 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и выход  $\sim 22\%$  при удельном энергокладе  $\sim 150 \text{ Дж/ммоль}$ . Энергетическая эффективность наработки синглетного кислорода составляла  $\sim 12\%$ .

Впервые в России в электро-разрядном КИЛ получен положительный коэффициент усиления активной среды  $((4-6) \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1})$ . Показано, что экспериментальные данные хорошо описываются суммой двух фойхтовских контуров: контура усиления для температуры 310 К и контура поглощения для температуры 95 К. Исходя из полученных результатов, оценены усиление и поглощение активной среды в центре контура, которые соответственно составили  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и  $-7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ .

Проведено экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование возможности фазового сложения двухканального взрывного фотодиссоционного лазера (ВФДЛ) с ВРМБ-зеркалом в условиях турбулентной атмосферной трассы. Расстояние между осями каналов составляло 31 см. Источник излучения в виде диафрагмы диаметром 0,6 см, из которой выходит излучение взрывного задающего генератора, расположен на расстоянии 2,5 км от входа в блок усилителей. Полученное экспериментально распределение плотности энергии в плоскости диафрагмы представляет собой интерференционную картину, характерную для фазового сложения излучения двух каналов (ширина полосы в картине согласуется с расстоянием между каналами). Расчетное распределение плотности энергии в плоскости диафрагмы, полученное в условиях умеренной атмосферной турбулентности, хорошо согласуется с экспериментальной картиной по общей ширине распределения и ширине полосы. В соответствии с рас-



Экспериментальная установка кислородно-йодного лазера КИЛ-10 в рабочем помещении

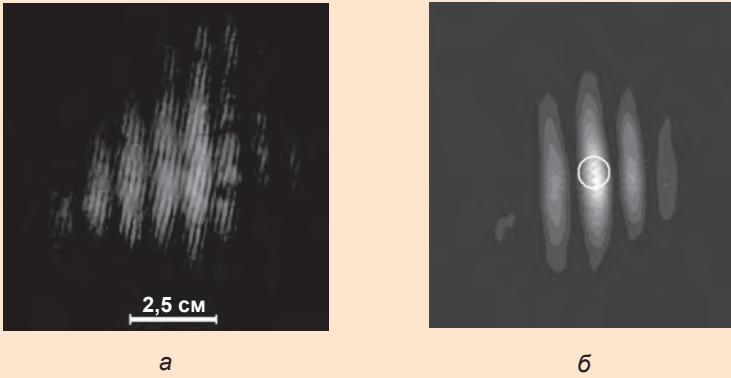


Экспериментальные и расчетные фойхтовские контуры поглощения и усиления активной среды:  $\circ$  — эксперимент; — — расчет,  $T=310 \text{ K}$ ; — — расчет,  $T=95 \text{ K}$

четами максимальная плотность энергии в плоскости диафрагмы увеличивается более чем в 4 раза по сравнению со случаем одноканального ВФДЛ — и в однородной, и в умеренно турбулентной атмосфере.

Экспериментально подтверждено предсказанное ранее новое явление — отсутствие обра-

щения волнового фронта (ОВФ) при ВРМБ сфокусированных лазерных пучков с винтовой дислокацией волнового фронта (вихревых мод Гаусса — Лагерра). ОВФ вихревых пучков не наблюдается из-за отсутствия селекции стоксовой моды, сопряженной лазерной моде. Это происходит вследствие того, что коэффици-

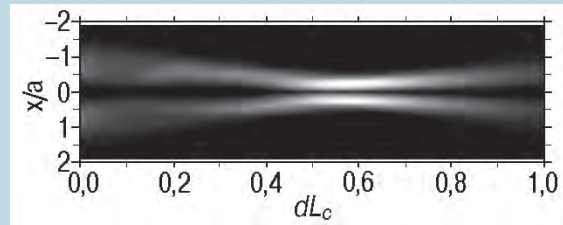


а б  
Распределение плотности энергии излучения ВФДЛ  
в плоскости диафрагмы задающего генератора  
в эксперименте (а) и расчете (б)

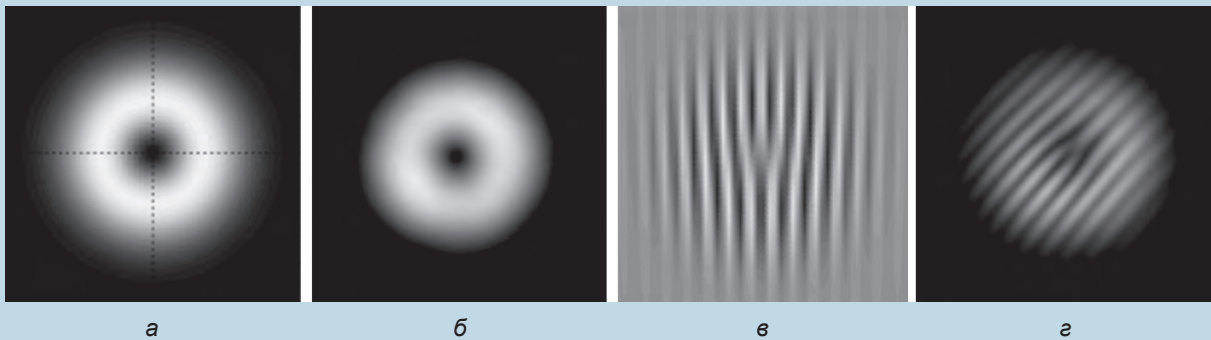
вое явление, названное преобразованием волнового фронта при ВРМБ. Его суть заключается в том, что в стоксовом пучке селектируется мода с регулярным фазовым фронтом, которая ортогональна лазерной моде. В режиме ВРМБ, близком к пороговому, селектируемая мода близка к основной гауссовой моде.

Реализован лабораторный рентгеновский лазер (РЛ) на переходе  $3p-3s$  Ne-подобного Ge ( $\lambda = 19,6$  нм) в квазистационарной схеме со столкновительной накачкой. Активная среда РЛ реализуется в плазме, образующейся при фокусировке

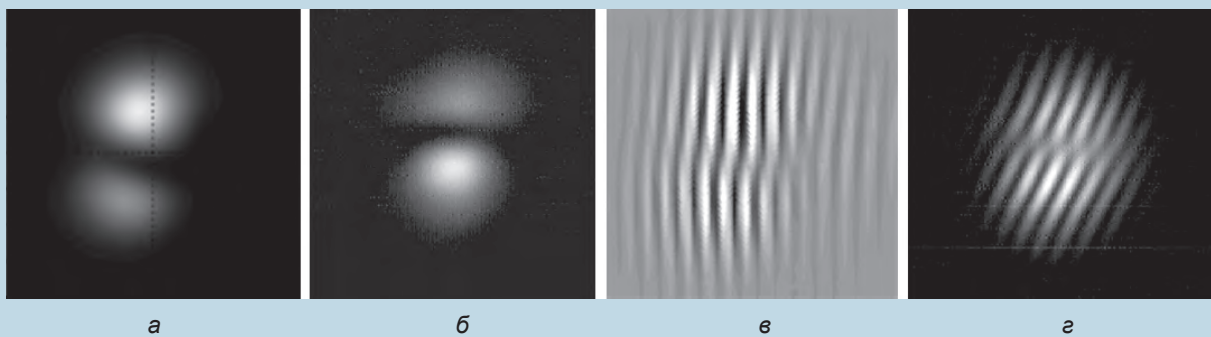
енты усиления стоксовой сопряженной моды и аналогичной моды с обратной спиральностью одинаковы. Поэтому стоксов пучок представляет собой случайную комбинацию нескольких мод, включая сопряженную. Для достаточно широкого класса вихревых пучков наблюдается но-



Сфокусированный в кювету ВРМБ вихревой  
лазерный пучок ( $LG_0^1$  мода)

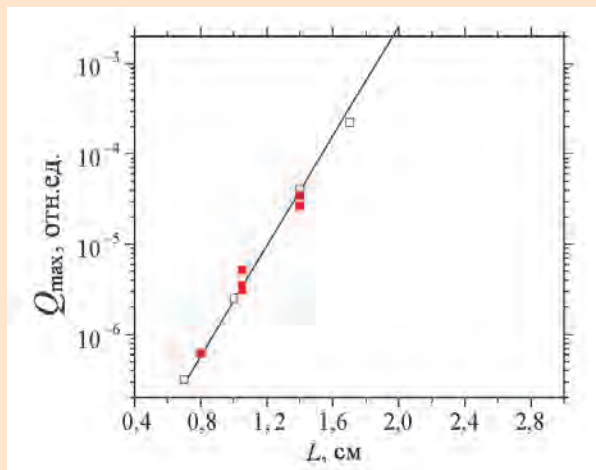


а б в г  
Распределение интенсивности вихревого лазерного пучка (а, б) и картина его интерференции с наклонно падающей плоской волной (в, г) в расчете (а, в) и эксперименте (б, г)

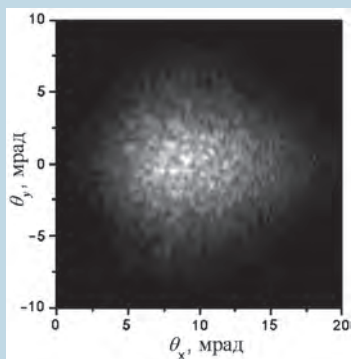


а б в г  
Распределение плотности энергии стоксова пучка (а, б) и картина его интерференции с наклонно падающей плоской волной (в, г) в расчете (а, в) и эксперименте (б, г)

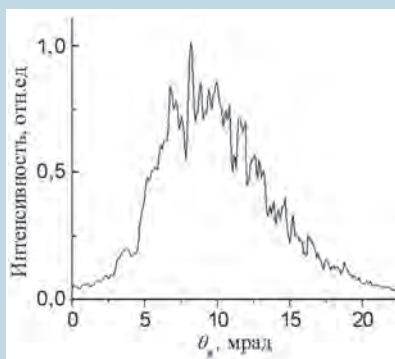
излучения одного из каналов лазерной установки «Искра-5» в строчку шириной около 200 мкм на плоской мишени. Длительность импульса накачки 0,5 нс, энергия 300 Дж. Мишень представляет собой плоскую стеклянную пластину длиной до 1,4 см с германиевым покрытием толщиной 0,15 мкм. Получено, что наблюдаемый коэффициент усиления РЛ составляет  $7 \text{ см}^{-1}$ , расходимость рентгеновского лазерного излучения 10 мрад, смещение пучка относительно оптической оси из-за рефракции 10 мрад. Трехмерное расчетное моделирование показало хорошее согласие с экспериментальными данными. Расчеты показа-



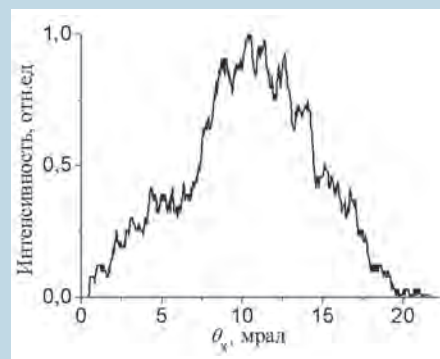
Зависимость спектральной яркости усиленного спонтанного излучения от длины мишени в расчетах (□) и эксперименте (■)



а



б



в

Пучок рентгеновского лазерного излучения в дальней зоне в расчете (а, б) и эксперименте (в)

ли, что использование в схеме РЛ рентгеновского зеркала с отражательной способностью 10% и организация двухпроходного режима усиления позволят в 10-20 раз повысить яркость излучения РЛ и существенно увеличить длину поперечной когерентности усиленного спонтанного излучения (УСИ), что важно для приложений.

На базе полупроводниковой камеры ионизационного типа и многокадровой электронно-оптической камеры разработан многокадровый регистратор излучения в ИК-диапазоне. Области применения регистратора:

- диагностика излучения импульсных, импульсно-периодич-

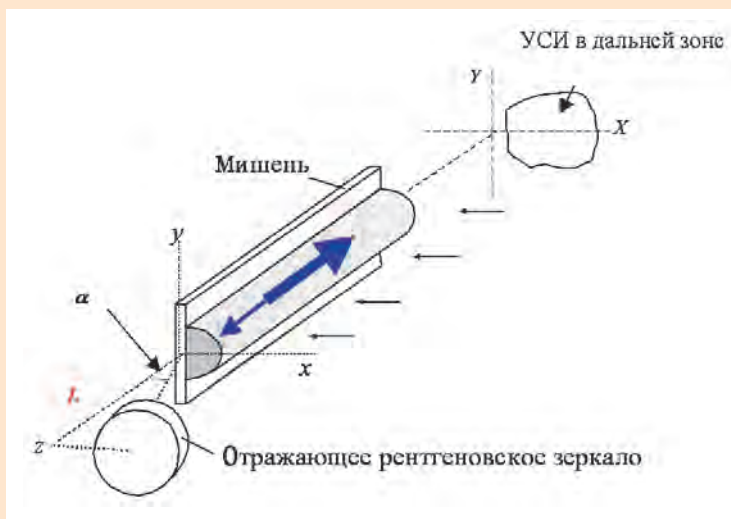
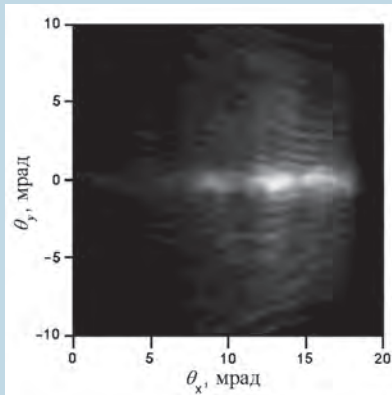
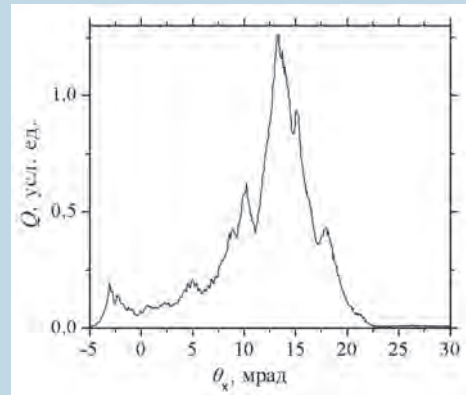


Схема РЛ с отражающим зеркалом





а

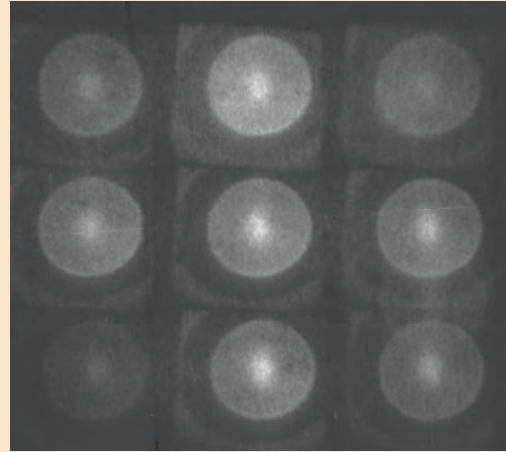


б

Расчетное распределение плотности энергии УСИ в дальней зоне (а) и ее срез по оси  $\theta_x$  (б) при наличии зеркала в схеме РЛ



Многокадровый регистратор  
КИТ-3М



Пример регистрации (нагрев вольфрамовой фольги  
электроразрядом с тыльной стороны; частота  
кадров — 100 кГц)

ческих и непрерывных лазеров ИК-диапазона;

- газодинамические исследования;
- разработка новых промышленных технологий с использованием лазерной сварки, резки и закалки металлов;
- дистанционная регистрация структуры тепловых полей тел при их ударном и аэродинамическом нагружении;
- импульсная электродинамика.

#### Основные технические характеристики

Входная апертура приемника	20 мм
Спектральный диапазон чувствительности	1–10 мкм
Минимальная регистрируемая температура	300 °С
Порог регистрации ( $\lambda = 3 \text{ мкм}$ )	$1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$
Динамический диапазон регистрации	$\geq 200$
Число кадров	9
Время экспозиции кадра	0,5–20 мкс
Частота кадров	50–500 кГц
Пространственное разрешение	100 пар лин./кадр
Габариты	185 × 405 × 450 мм
Масса	13,5 кг
Энергопотребление	220 В, 30 Вт

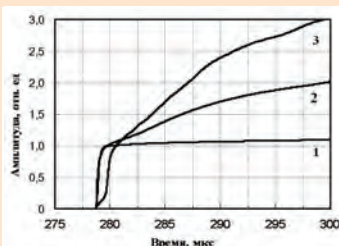
## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

В электрофизическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ завершена серия взрывных экспериментов по исследованию времени жизни и радиационных свойств высокотемпературной плазмы, создаваемой в электроразрядных камерах МАГО (МАГО-7, МАГО-8, МАГО-9), запитываемых током взрывомагнитного генератора. Регистрация излучения проводилась сцинтиляционными детекторами, измерение спектральных характеристик — спектрометром Данте.

В экспериментах зарегистрирован источник излучения с основным пиком длительностью  $\leq 0,5$  мкс и «хвостом» длительностью  $\geq 10$  мкс. В опытах МАГО-8, 9 интегральная доза излучения в «хвостах» превышает дозу основного пика. Наличие длительного «хвоста» в импульсе рентгеновского излу-

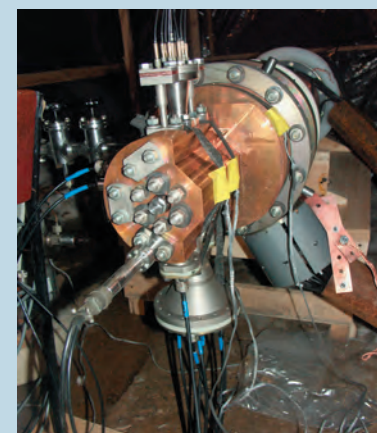
чения можно объяснить наличием в камерах МАГО области горячей водородной плазмы.

В опыте МАГО-9 проведены спектральные измерения излучения плазмы. Зарегистрированный спектр излучения близок к водородоподобному. Особенности, характерных для излучения примесей тяжелых элементов, в спектре не обнаружено.

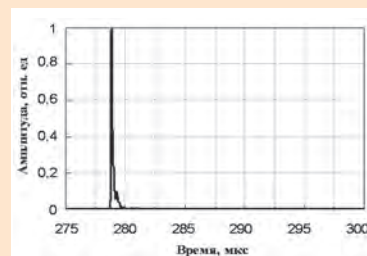


Интегральные дозы излучения, накопленные детекторами.

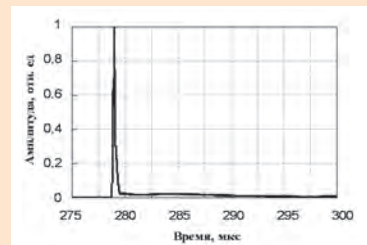
Опыты: 1 — МАГО-7;  
2 — МАГО-8; 3 — МАГО-9



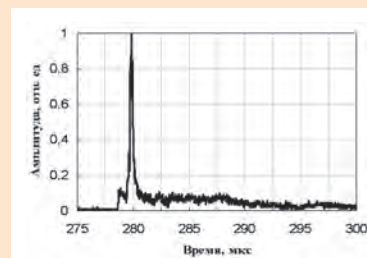
Экспериментальная сборка МАГО-9



а

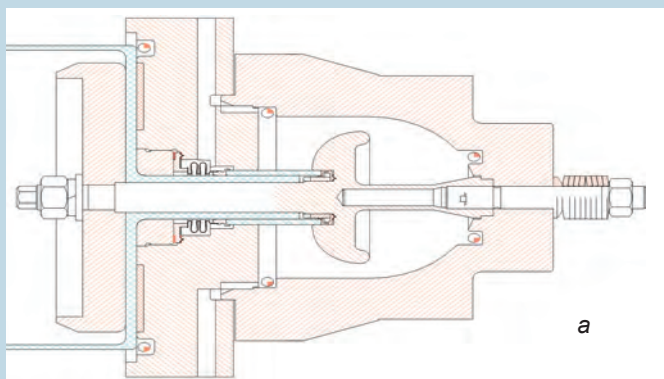


б

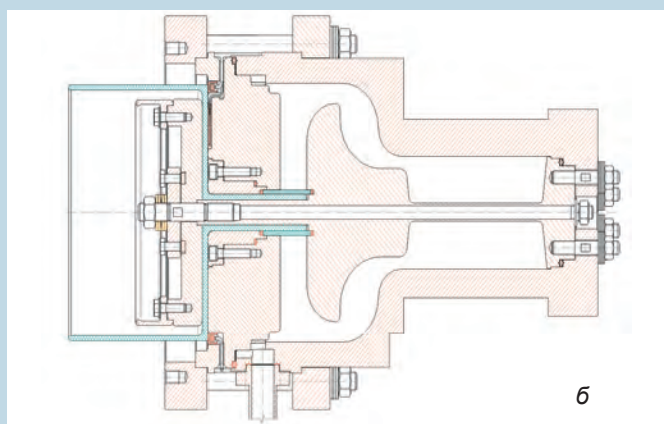


в

Сигналы детекторов рентгеновского излучения опытов: а — МАГО-7; б — МАГО-8; в — МАГО-9



а



б

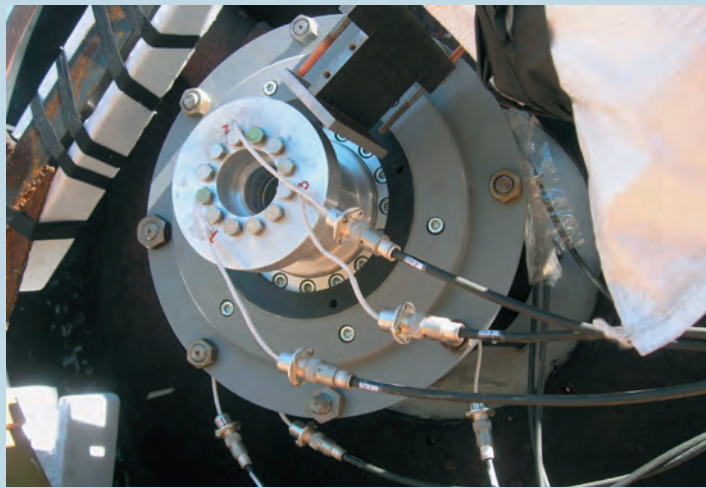
Плазменные камеры: а — МАГО-7, 8; б — МАГО-9

Создан экспериментальный стенд для моделирования физических процессов и свойств веществ. Энергетической основой стенда являются уничтожаемые источники тока на основе спиральных ВМГ. Стенд оснащен многокадровой рентгенографической системой, позволяющей делать до четырех кадров длительностью  $\leq 10$  нс со скважностью  $\geq 0,5$  мкс. Рабочее напряжение рентгеновских аппаратов до 700 кВ.

Отработаны системы защиты рентгеновских аппаратов, рентгеновских пленок, а также сохранения исследуемых образцов в условиях воздействия ударных волн и поля осколков обратного токопровода.



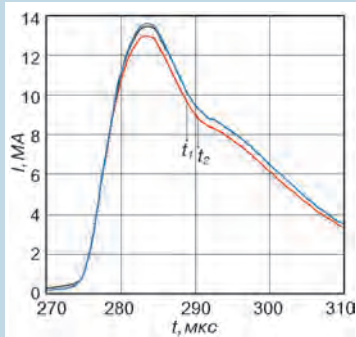
Стенд со стороны источника тока



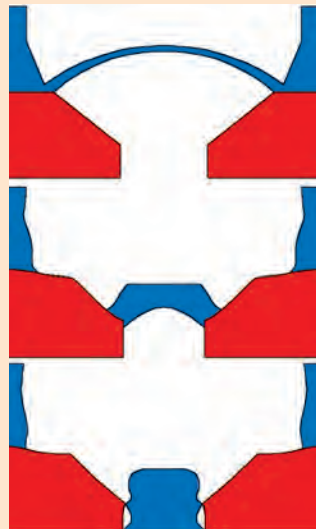
Стенд со стороны нагрузки



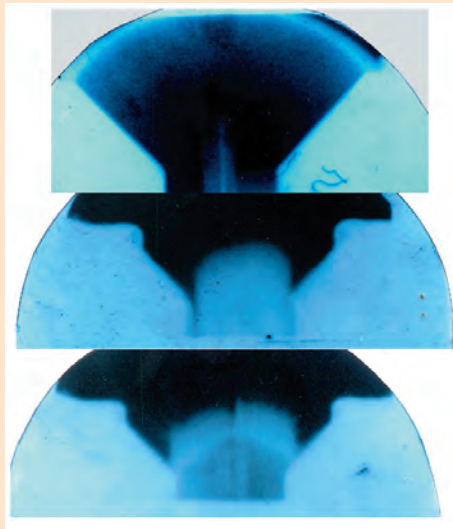
Квазисферический лайнер



Ток ( $t_1$ ,  $t_2$  — времена рентгенографирования)



а



б

Обжатие металлического лайнера: а — расчет, б — экспериментальная рентгенограмма

## ОТДЕЛЕНИЕ ТРИТИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Оксид цинка, обедненный по изотопу цинк-64, используется в системах водоподготовки большинства атомных электростанций, эксплуатирующих реакторы с водяным охлаждением. Получение оксида цинка включает в себя изотопное обеднение диэтилцинка природного изотопного состава и его последующую переработку в конечный продукт. В результате совместных исследований, выполненных специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИМХ РАН им. Г. А. Разуваева, разработана перспективная технология получения оксида цинка из диэтилцинка путем его жидкофазного гидролиза в среде органического растворителя. Предложенная схема отличается повышенной безопасностью, низкими технологическими потерями и возможностью оперативно контролировать ход процесса.

Перспективной разработкой отделения являются твердотельные фтор-ионные источники тока. В октябре 2005 года по контракту с американской фирмой *General Atomics* была поставлена в США первая партия твердотельных высокотемпературных батарей SSD-10V — прототипов батарей, предназначенных для электрического питания оборудования нефтяных, газовых и геотермальных скважин при температурах 25–250 °С. В настоящее время аналогов таких батарей нет. Ведется работа по совершенствованию технологии изготовления батарей с более высокими энергетическими характеристиками и мощностью.



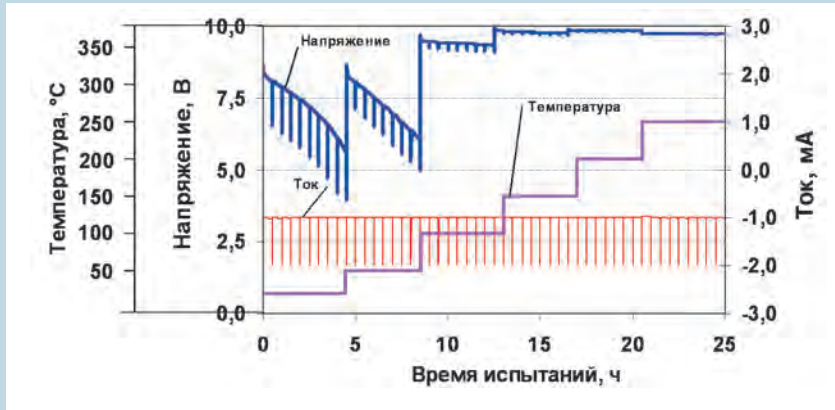
Схема технологического процесса по переработке диэтилцинка, обедненного по изотопу цинк-64, в оксид цинка

### Характеристики батарей

Напряжение разомкнутой цепи, В	10,49
Напряжение разряда, В	5–10
Ток разряда, мА	1
Рабочая температура, °С	25–250
Исходная электрическая емкость, А·ч	0,5
Диаметр, мм	33
Высота, мм	52
Масса, г	262



Батареи, изготовленные по контракту с General Atomics (США)



Суммарный график разряда батарей в диапазоне температур 25–250 °С:  
ток разряда 1 мА, импульсный ток разряда 2 мА

## НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Разработан и внедрен в производственную практику новый метод численного анализа опасности, возникающей при аварийных и плановых выбросах горючих газов, которые транспортиру-

ются по трубопроводным сетям предприятий ТЭК. Метод предполагает выполнение поэтапного численного моделирования: 1) механизма зарождения аварийной ситуации на конкретном объ-

екте ТЭК с использованием базовых моделей механики сплошных сред (уравнений Навье и уравнений движения деформируемого твердого тела); 2) образования и распространения в окружающей



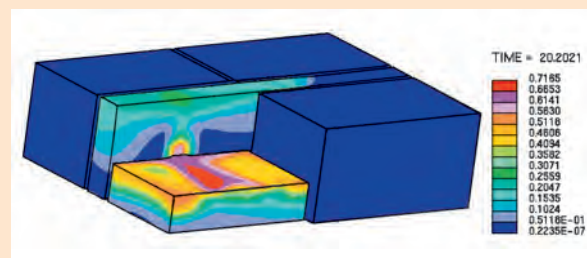
а



б



в



г

Пример моделирования аварийного выброса на газораспределительной станции (ГРС) компании SPP (Словакия): объект моделирования (вид спереди (а) и вид сбоку (б)); моделирование распространения метановоздушных смесей на ГРС (поля относительных массовых концентраций метана) по территории объекта (в) и внутри здания диспетчерского пункта ГРС (г)

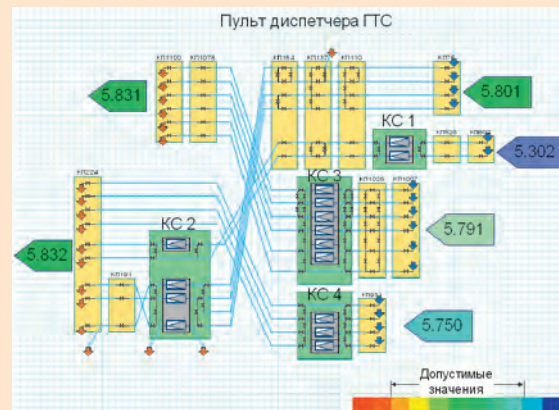
среде пожаровзрывоопасной газозвоздушной смеси в результате совместного решения системы уравнений Рейнольдса и системы одномерных уравнений газовой динамики, предназначенной для анализа функционирования источника выброса. Результаты моделирования используются при численном анализе риска возникновения пожара или взрыва на объекте ТЭК и разработке мероприятий по их предотвращению.

Впервые разработан метод построения компьютерных тренажеров с использованием высокоточных газодинамических симуляторов промышленных трубопроводных сетей. В основе данного метода лежит подход, базирующийся на адекватном моделировании всей совокупности физических процессов транспортирования опасных газовых смесей, определяемых технологией функционирования конкретной газотранспортной сети и различными сценариями развития аварийных ситуаций. В совокупности с преимуществами адекватного моделирования работы конкретных газотранспортных объектов метод построения тренажеров позволяет сформировать средства детерминистского и стохастического управления процессом обучения. Тренажеры предназначены для обучения широкого круга специалистов газовой и химической промышленности, отвечающих за безопасность и эффективность транспортирования опасных газовых смесей. Тренажеры широко применяются в учебных целях в Волгоградском центре повышения квалификации ведущих специалистов эксплуатационных служб и диспетчерских центров ОАО «Газпром».

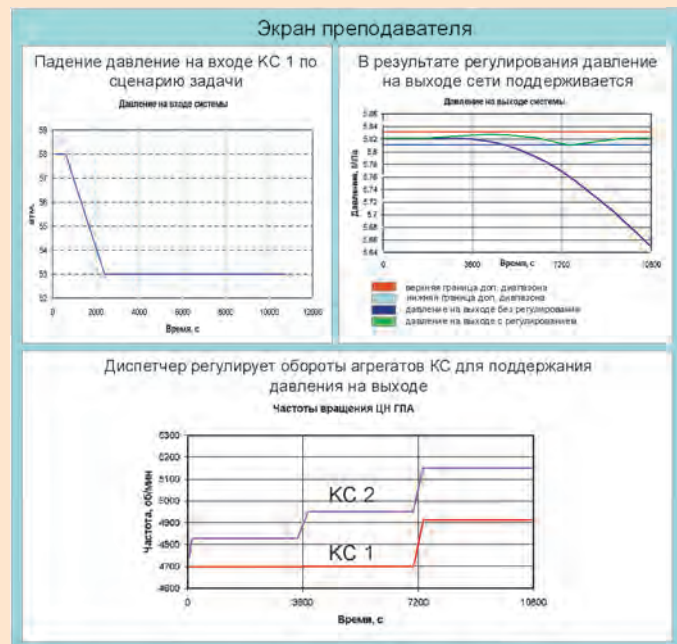
Разработан и внедрен в производственную практику новый метод построения компьютерных газодинамических симуляторов разветвленных систем рек и каналов с открытым руслом для оперативного анализа риска



Типовая компоновочная схема газодинамического тренажера трубопроводных сетей



а



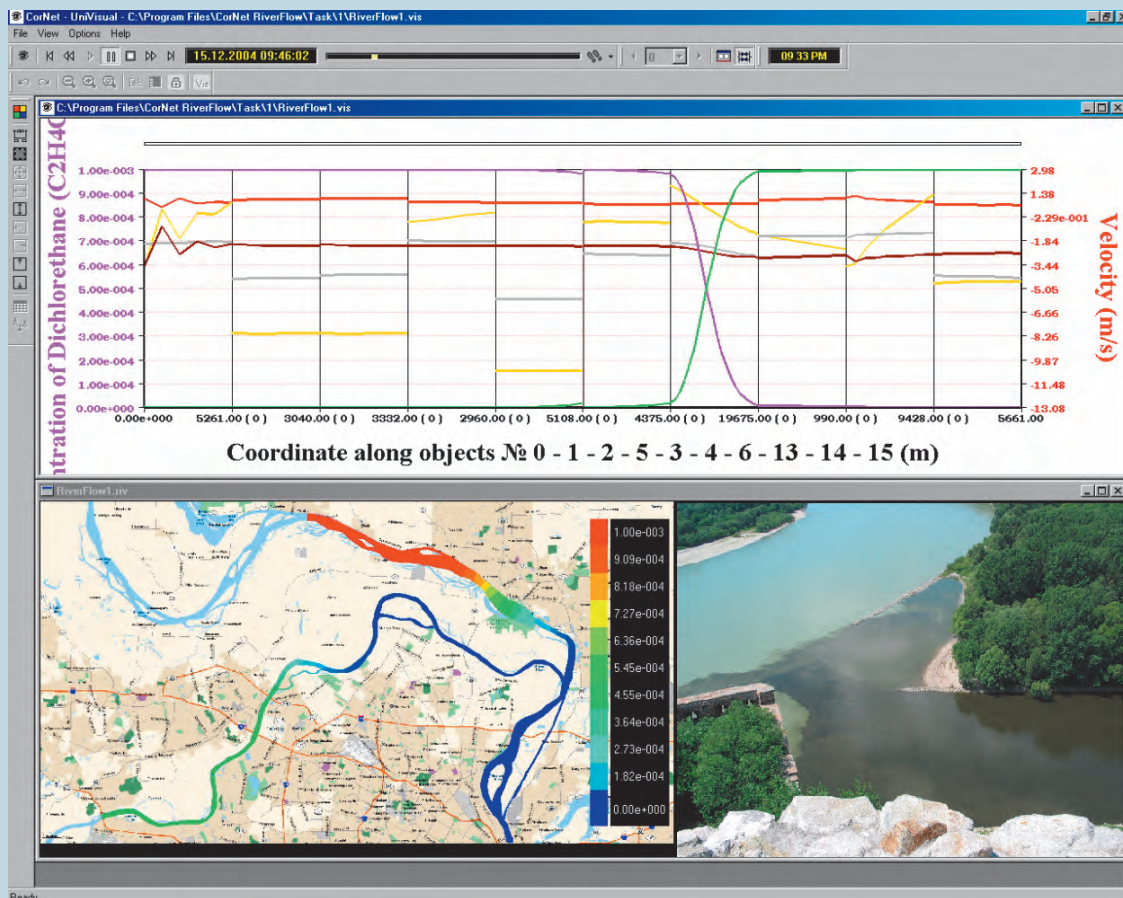
б

Пример интерфейса тренажера диспетчера газотранспортной сети: а — пульт управления диспетчера; б — экранная форма преподавателя

распространения жидких загрязняющих веществ по рекам при сбросах загрязняющих веществ с предприятий ТЭК. Гидравлический симулятор представляет собой компьютерную аналитическую систему, позволяющую моделировать физические про-

цессы течения многокомпонентных и многофазных сред по системам рек и каналов с открытым руслом. Он строится на базе адаптации полной системы уравнений гидродинамики для описания течения сред по разветвленным системам рек и

каналов. Настройка симулятора на параметры реальной системы рек и каналов производится перед началом его эксплуатации в результате постановки и решения минимаксной оптимизационной задачи.



Фрагмент рабочего окна гидравлического симулятора  
(оттенками цветов показана удельная массовая концентрация загрязняющего вещества)

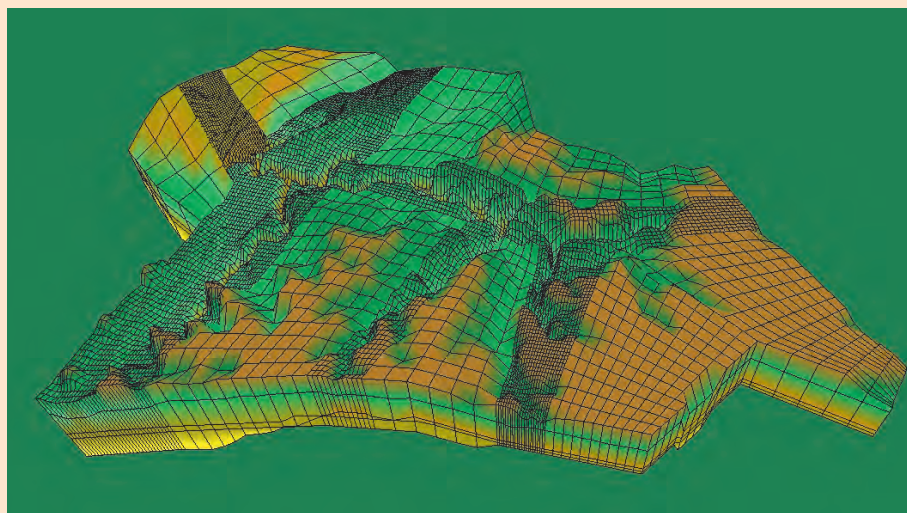
## ОТДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Программный моделирующий комплекс NIMFA, предназначенный для численного моделирования трехмерного нестационарного потока в пористых средах и переноса загрязнений, имеет высокую эффективность в решении широкого круга наукоемких задач экологической и горно-промышленной гидрогеологии, включая поддержку решения за-

дач оптимизации, автоматизированного мониторинга, оценки ресурсов и качества подземных вод, создания гидродинамических и транспортных моделей территорий в районах с особо сложными гидрогеологическими условиями, оценки эффективности защиты могильников хранения опасных отходов. Комплекс NIMFA имеет системы хранения и

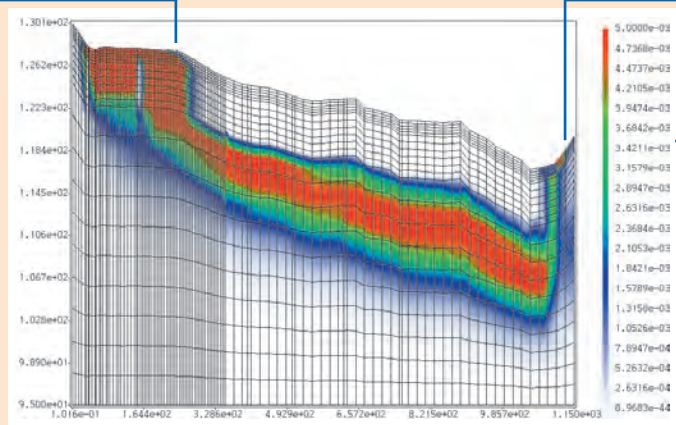
представления исходных данных и результатов расчетов. Разработан трехмерный графический интерфейс. Проведена верификация программы и ее апробация в производственном режиме.

Разработана серия автоматизированных рабочих мест (АРМ) для контроля радиационной безопасности при проведении работ с источниками ионизирующего излучения:



Трехмерная модель геологических пластов комплекса NIMFA

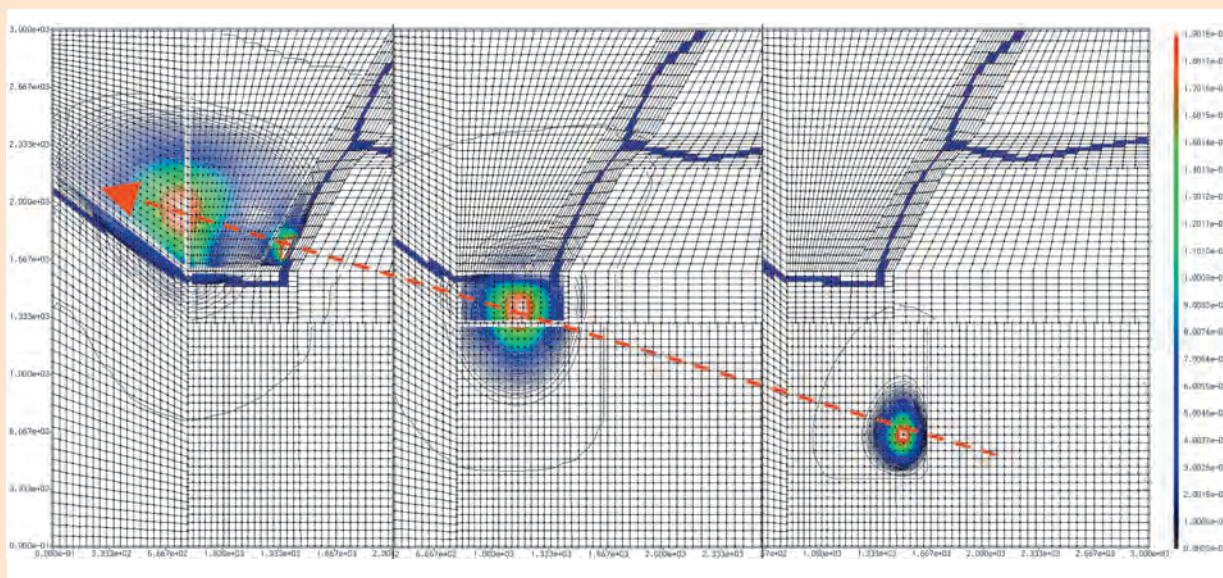
Источник  
загрязнения



Объект защиты  
(река)

Уровни  
концентрации

Поле концентраций (вертикальное сечение)



Распространение примесей с поверхности (вид в плане)

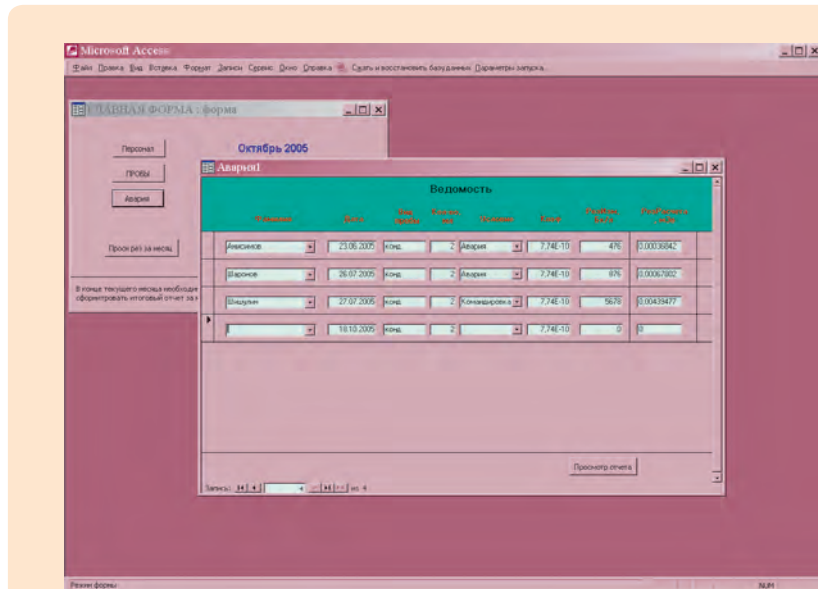


- АРМ оператора-дозиметриста;
- АРМ специалиста по контролю радиационной обстановки в помещении;
- АРМ инженера-исследователя (руководителя).

Создана система экологического мониторинга радиационно-опасного объекта в составе информационно-аналитического центра, источников первичной информации о радиозоологическом состоянии природных объектов и антропогенных источников, средств связи, автоматизированных мест (АРМ) пользователей.

Система создана для контроля воздействий предприятия на окружающую среду, поддержки процесса управления и нормативно-правового обеспечения радиозоологической безопасности предприятия.

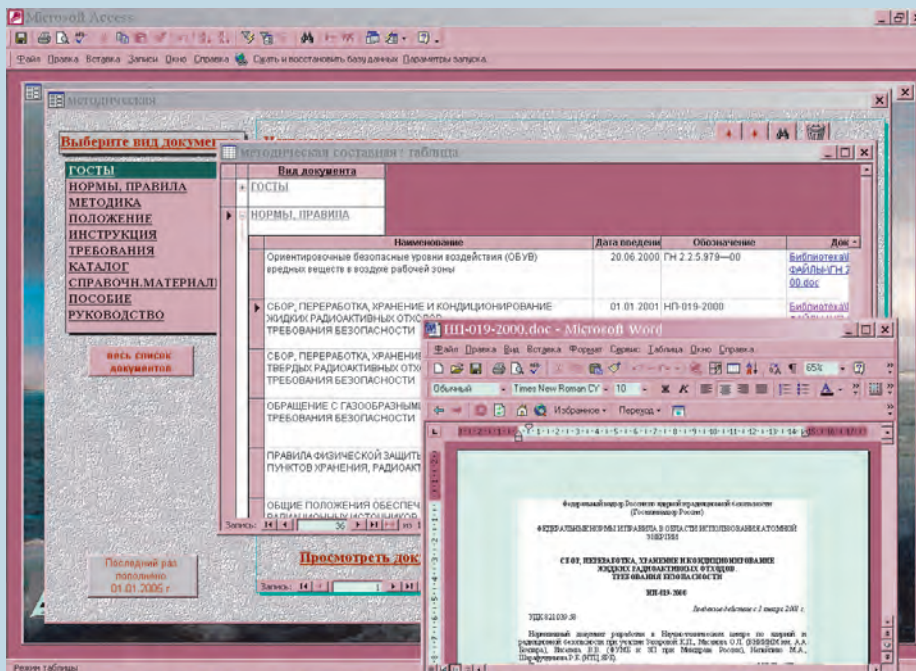
Информационно-аналитический центр состоит из модулей, организованных в виде АРМ: «Базы данных», «Геоинформационная система», «Моделирование», «Биологические исследования», «Администратор системы».



Ввод исходных данных для расчета дозовых нагрузок персонала

Разработана экспертная система «Оптимизация защитных экранов», конкурирующая по эффективности с решениями эксперта при создании могильников для хранения опасных отходов, в том числе радиоактивных (РАО). Основным назначением системы является учет неопределенности имеющихся данных, моделей и связанных с ними рисков. Экспертная система предназначена для выработки оптимальных проектно-конструкторских и экономических решений, обеспечивающих заданный уровень надежности и безопасности площадок складирования РАО. На конкретном примере пройдена вся технологическая цепочка системы. Контрольный расчет показал высокую точность прогноза.

Экспертная система предназначена для выработки оптимальных проектно-конструкторских и экономических решений, обеспечивающих заданный уровень надежности и безопасности площадок складирования РАО. На конкретном примере пройдена вся технологическая цепочка системы. Контрольный расчет показал высокую точность прогноза.



Интерфейс базы данных нормативно-методической документации



## РАЗРАБОТКА НЕЯДЕРНЫХ ВООРУЖЕНИЙ

В РФЯЦ-ВНИИЭФ завершена разработка тандемной кумулятивной боевой части (БЧ) для противотанкового ракетного комплекса (ПТРК) «Хризантема-С», принятого на вооружение Рос-

сийской армии. Разработчиком комплекса является ФГУП «КБМ» г. Коломна.

Боевая часть обладает рекордным в России бронепробитием и в составе комплекса обеспечи-

вает поражение всех современных и перспективных танков, оснащенных динамической защитой, боевых машин пехоты, инженерных сооружений, долговременных огневых точек, катеров, низколетящих малоскоростных самолетов и вертолетов.

В целях дальнейшего совершенствования кумулятивных боеприпасов проведены исследования по возможности применения гидростатического пресования шашки с воронкой, в результате которых существенно повысилась стабильность бронепробития. На заводе РФЯЦ-ВНИИЭФ организовано серийное производство БЧ.



*Боевая часть*



*ПТРК «Хризантема-С»*



# 2005