

## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

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

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

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

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

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

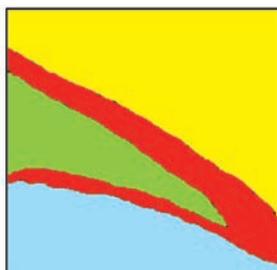
Созданы новые версии программных комплексов, основанных на связи газодинамической методики РАЗЭС-КП с методиками расчета переноса частиц и излучения как разностными методами, так и методом Монте-Карло, что позволило расширить класс решаемых задач.

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

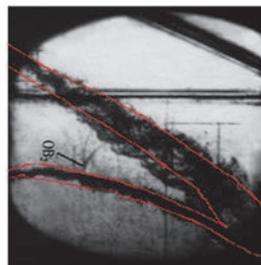
Продолжено развитие программного комплекса ЛОГОС-2 для расчета на многопроцессорных ЭВМ задач теплопереноса и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС).

В 2008 году:

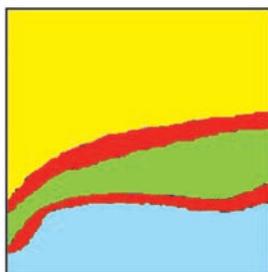
- Предъявлена к сдаче в опытную эксплуатацию первая очередь комплекса для расчета теплофизических процессов (однофазные течения) и НДС. Проводились тестирование, верификация и валидация ком-



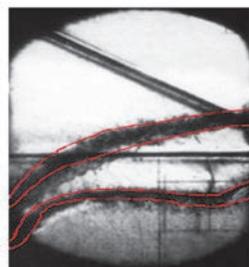
750 мкс



750 мкс

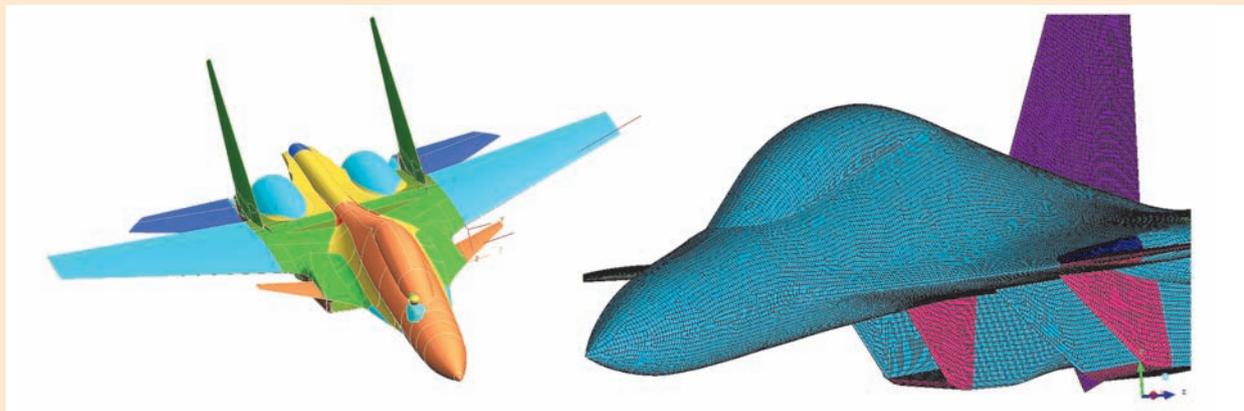


833 мкс



833 мкс

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



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

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

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

- гидравлических течений и теплообмена в энергетических установках;

- аэродинамических характеристик летательных аппаратов.

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

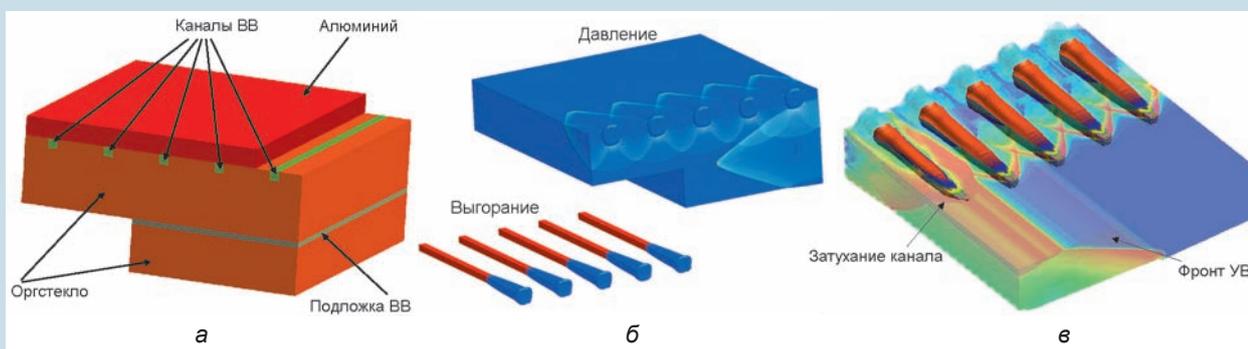
- Разработана концепция графической оболочки пользователя комплекса ЛОГОС-2, описаны необходимые функциональные возможности оболочки и предполагаемый интерфейс пользователя.

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

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

При моделировании процессов детонации особое внимание

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



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

десенсибилизации ВВ прекращается, что полностью согласуется с результатами эксперимента.

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

Методика СОЛЯРИС, предназначенная для численного решения на многопроцессор-

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

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

- к методике подключена программа одномерной газодинамики,

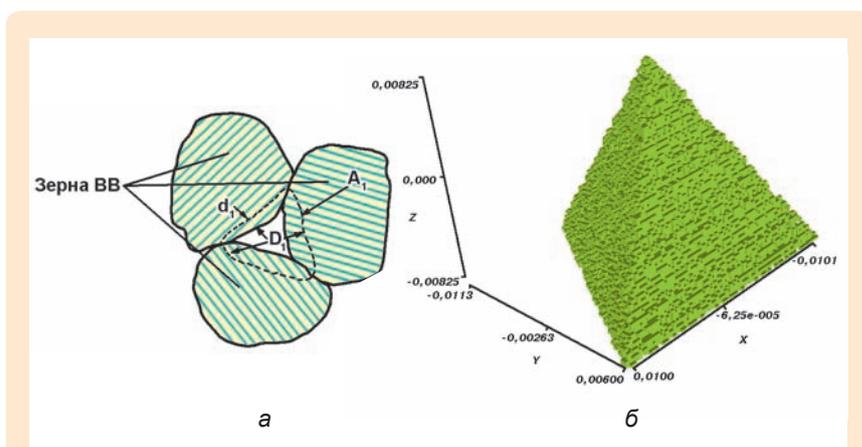
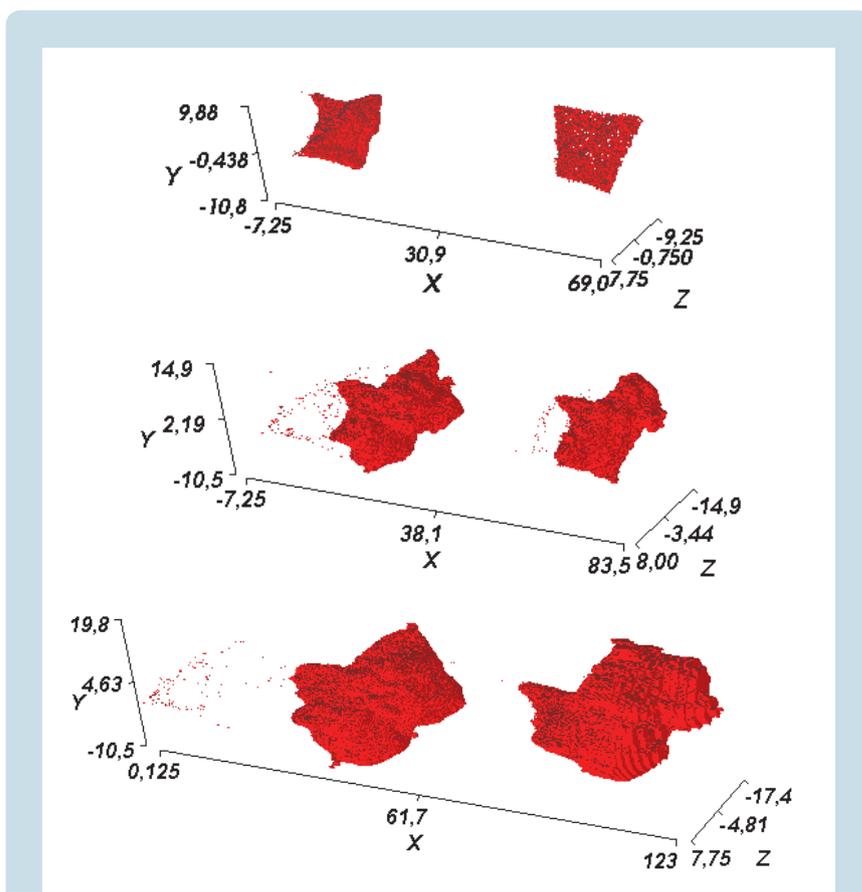


Схема газового включения (а) и начальная форма одного из газодовых включений в расчете (б):  $A_1$  – поверхность горячей точки;  $d_1$  – толщина зоны реакции, вызванной ударом;  $D_1$  – характерная длина горячей точки



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

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

- введена возможность расчета лучистой теплопроводности,

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

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

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

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

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

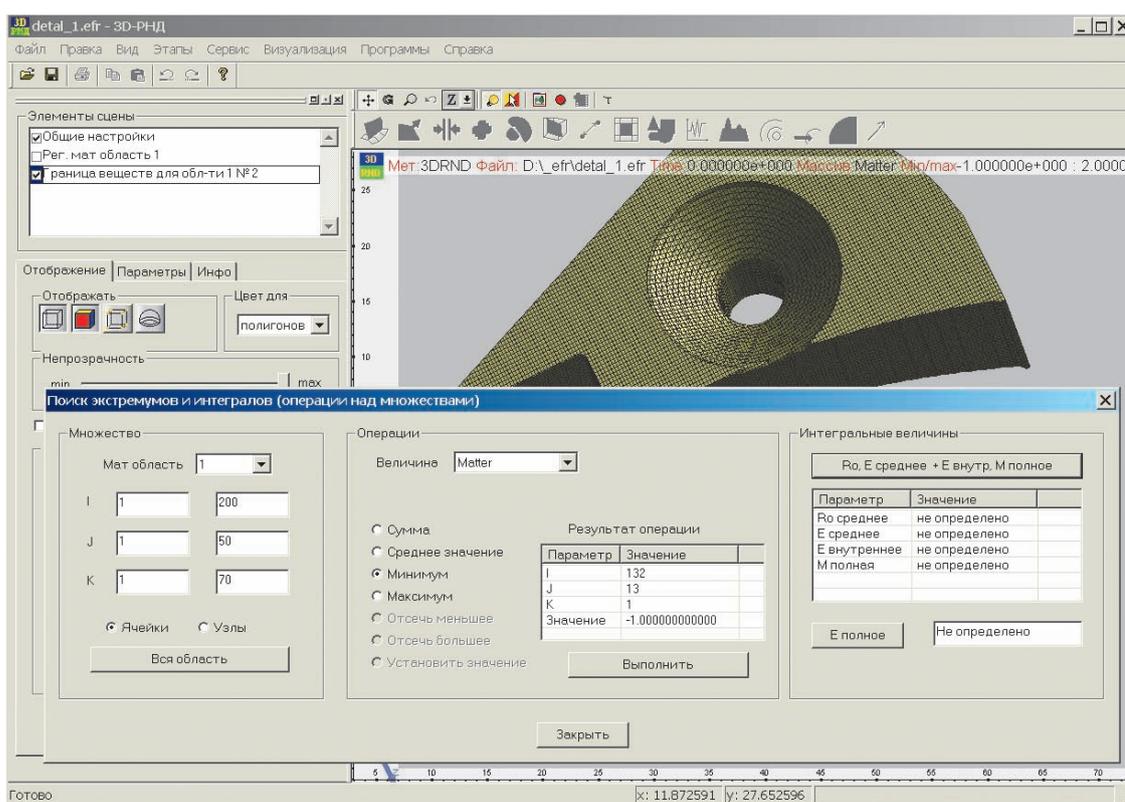
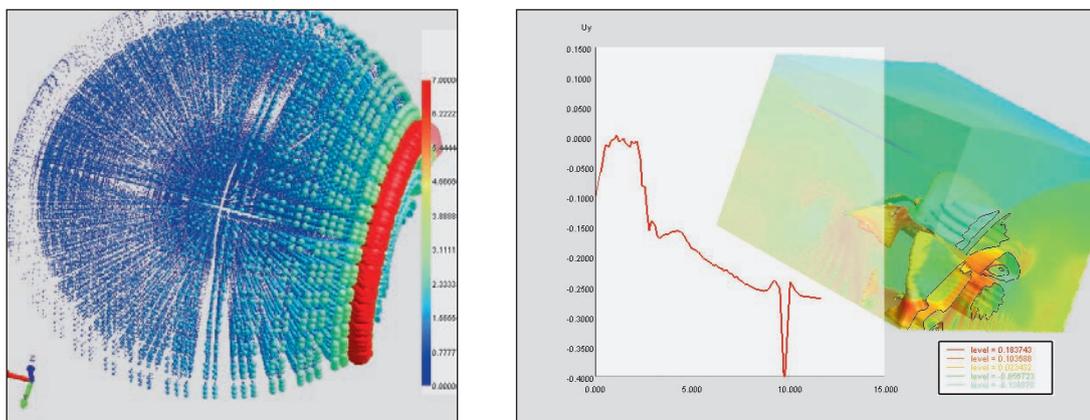
Завершено исследование эффективности алгоритма распараллеливания вычислений при решении двумерных уравнений Максвелла в  $2d3p$ -программе расчета взаимодействия лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой. Получены оценки элементарных затрат на отдельных этапах вычислений и установлена формула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

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

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

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

Реализована возможность расчета начальных данных для



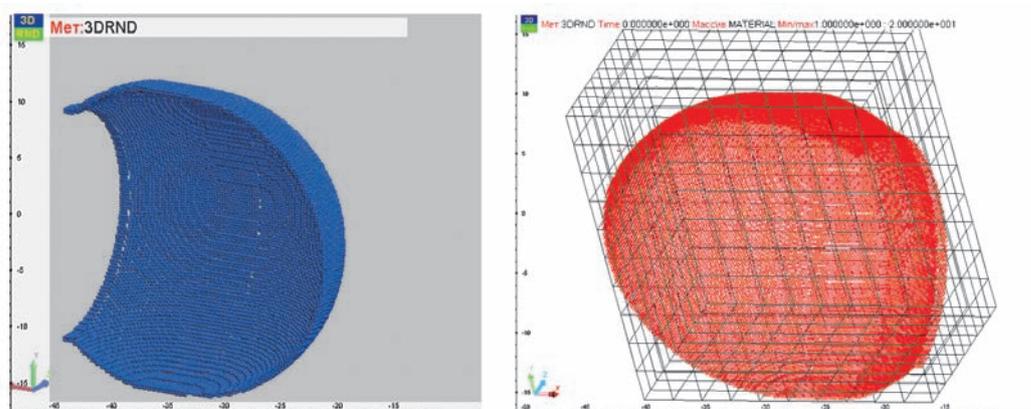
Пример визуализации результатов расчетов с использованием пакета программ ScientificView

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

тов задач кластерной динамики и газодинамических течений.

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

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



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

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

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

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

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

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

- в рамках системы для исследования и анализа эффективно-

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

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

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

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

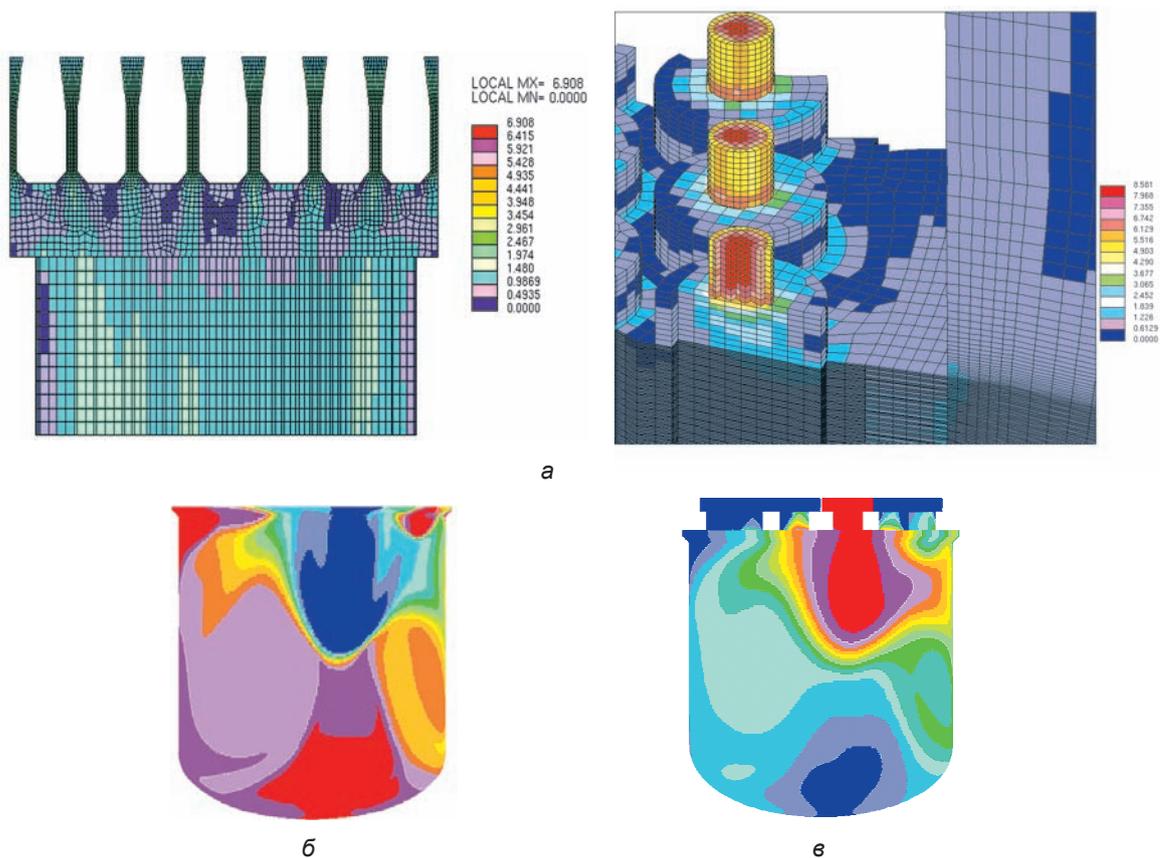
событий в процессе выполнения параллельного приложения, позволяющая оперативно обнаруживать критические участки программы;

- реализован параллельный вариант системы автоматической миграции файлов.

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

мощности. В рамках совместной работы специалисты ИТМФ:

- Разработали и создали многопроцессорную ЭВМ производительностью 20 терафлоп, которая вошла в состав ВЦКП и наряду с другими ЭВМ использовалась для проведения расчетного моделирования задач ОКБМ.
- Создали высокоскоростной канал связи для удаленного доступа специалистов ОКБМ к вычислительным ресурсам ВЦКП. Специалисты ОКБМ со своих рабочих мест проводили на ЭВМ расчеты ряда задач (задачи прочности и тепломассопереноса), решение которых невозможно на вычислительных ресурсах ОКБМ.
- Создали версию пакета программ RACHAP-2 разработки ОКБМ для расчета теплогидравлических процессов в активной зоне ЯЭУ в параллельном режиме на многопроцессорных ЭВМ.



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

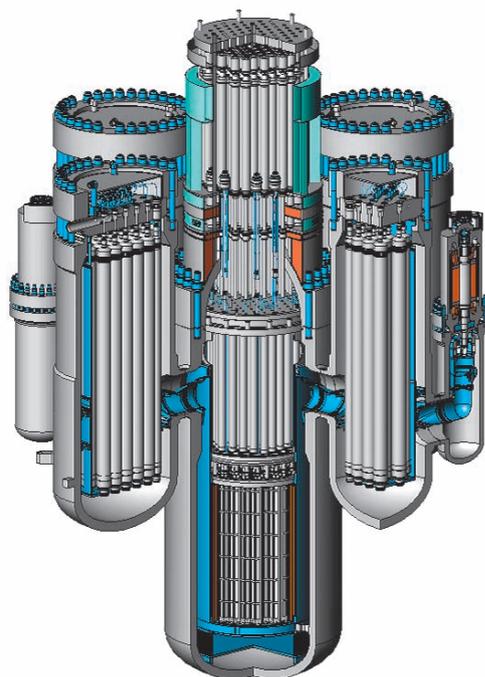
Введение параллелизма в пакет RASHP-2 позволяет существенно сократить календарные сроки проведения расчетов. После создания полностью параллельной версии программы (активная зона и все гидродинамические контуры и элементы) в 2009 году можно будет проводить расчеты

на большом числе процессоров в режиме on-line.

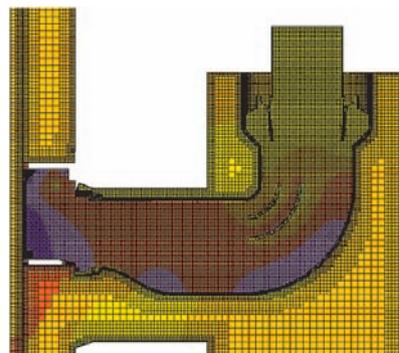
• Ведут работы по усовершенствованию созданных пакетов программ для расчета задач трехмерного инженерного анализа в интересах ОКБМ. Для программных пакетов ДАНКО (расчет задач прочности конструкций)

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

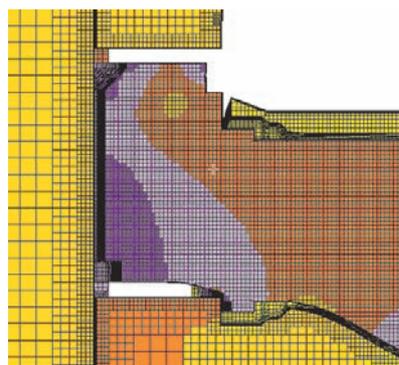
• Выполнили большой объем расчетных исследований по программным пакетам ЛОГОС-2 и ДАНКО в интересах ОКБМ на многопроцессорных ЭВМ (установки РИТМ-200, ВБЭР-300).



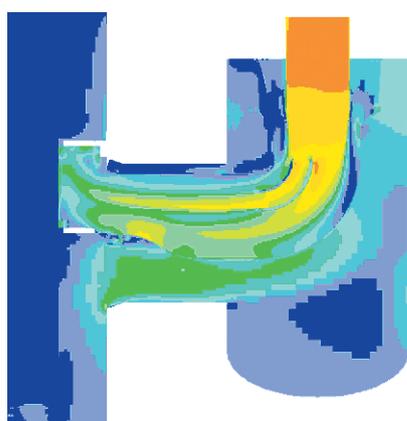
а



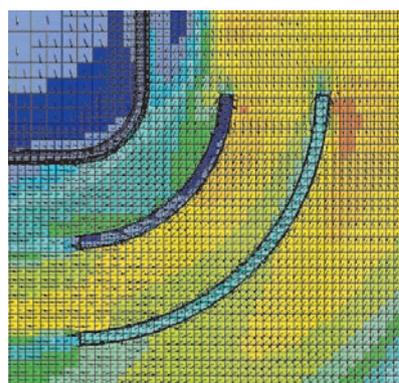
б



в

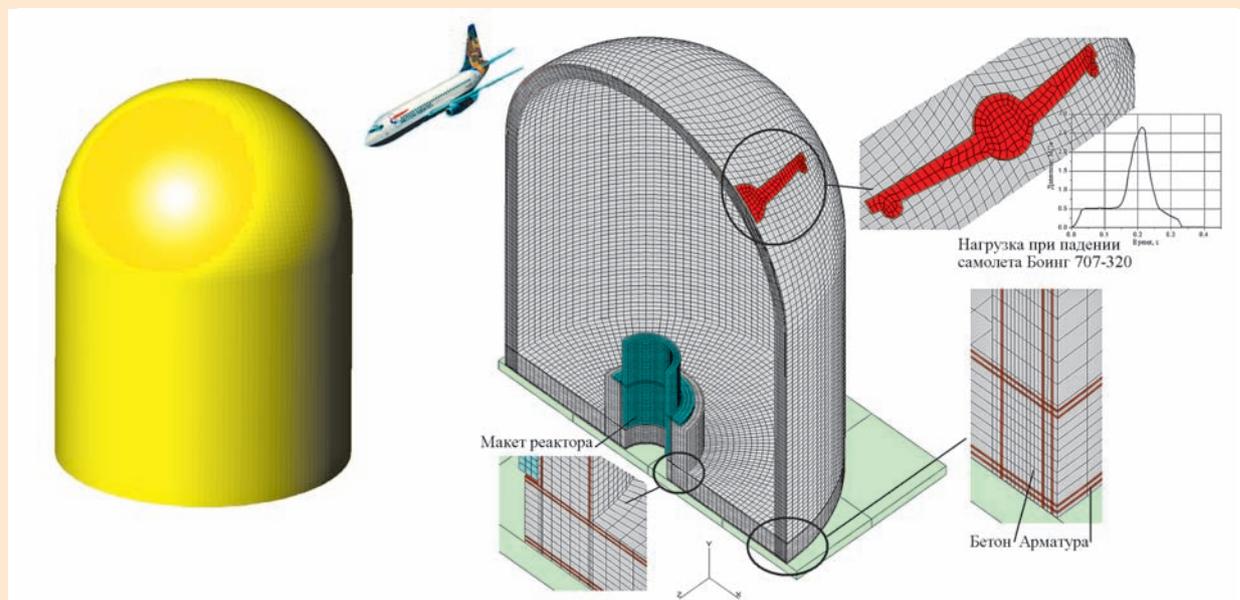


г



д

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



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

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

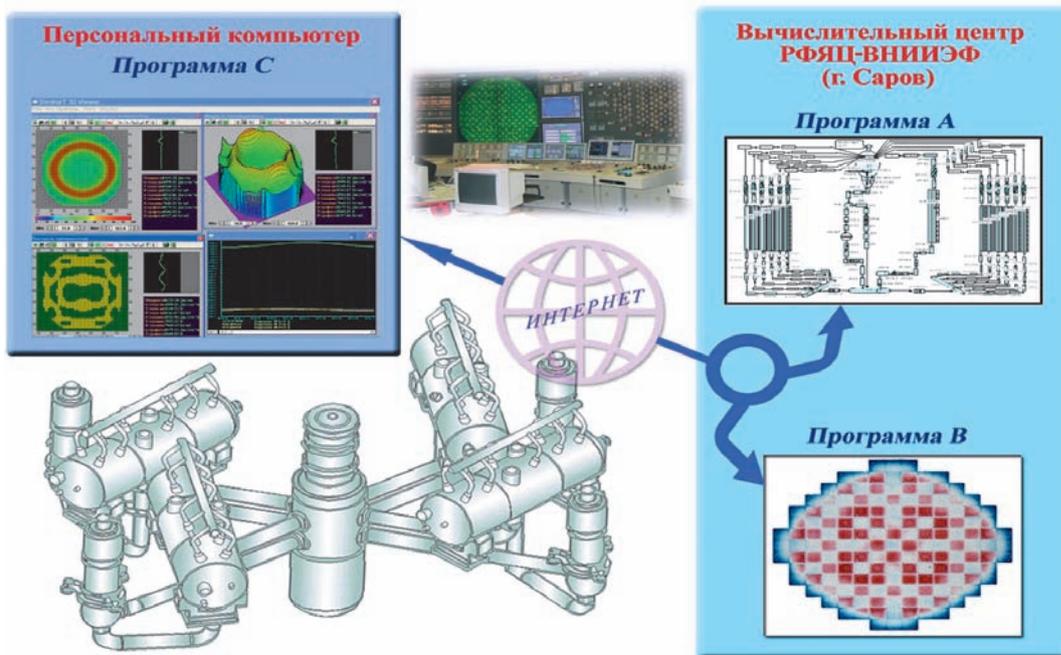
на многопроцессорных ЭВМ с сохранением независимости и закрытости самих кодов. Технология обеспечивает:

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

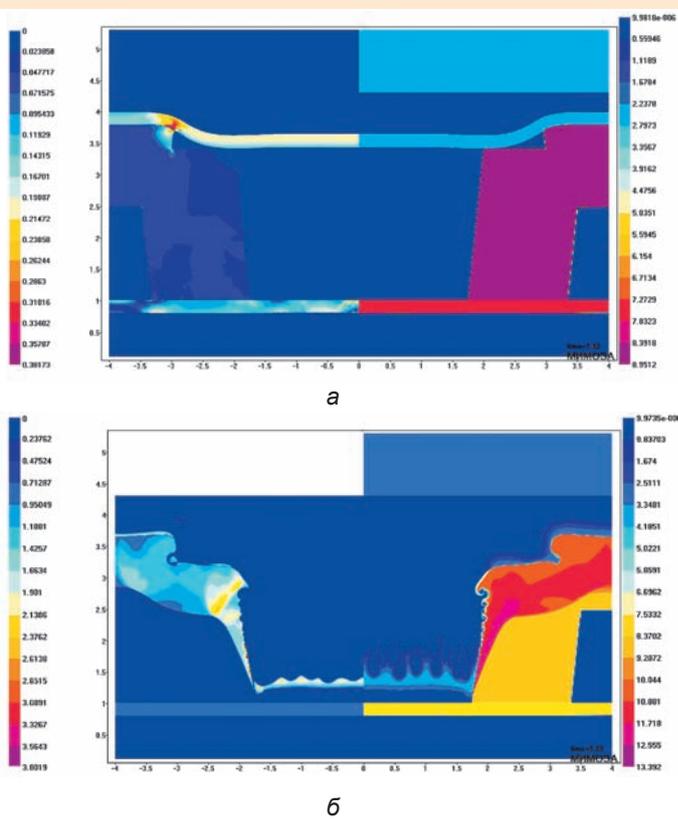
На эйлеровых сетках проведены МГД-расчеты сжатия лайнерных систем при больших токах (до 60 МА), магнитных полях (до 5 МГс) и скоростях лайнера (до 24 км/с). Эти системы представляют интерес для экспериментов

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

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



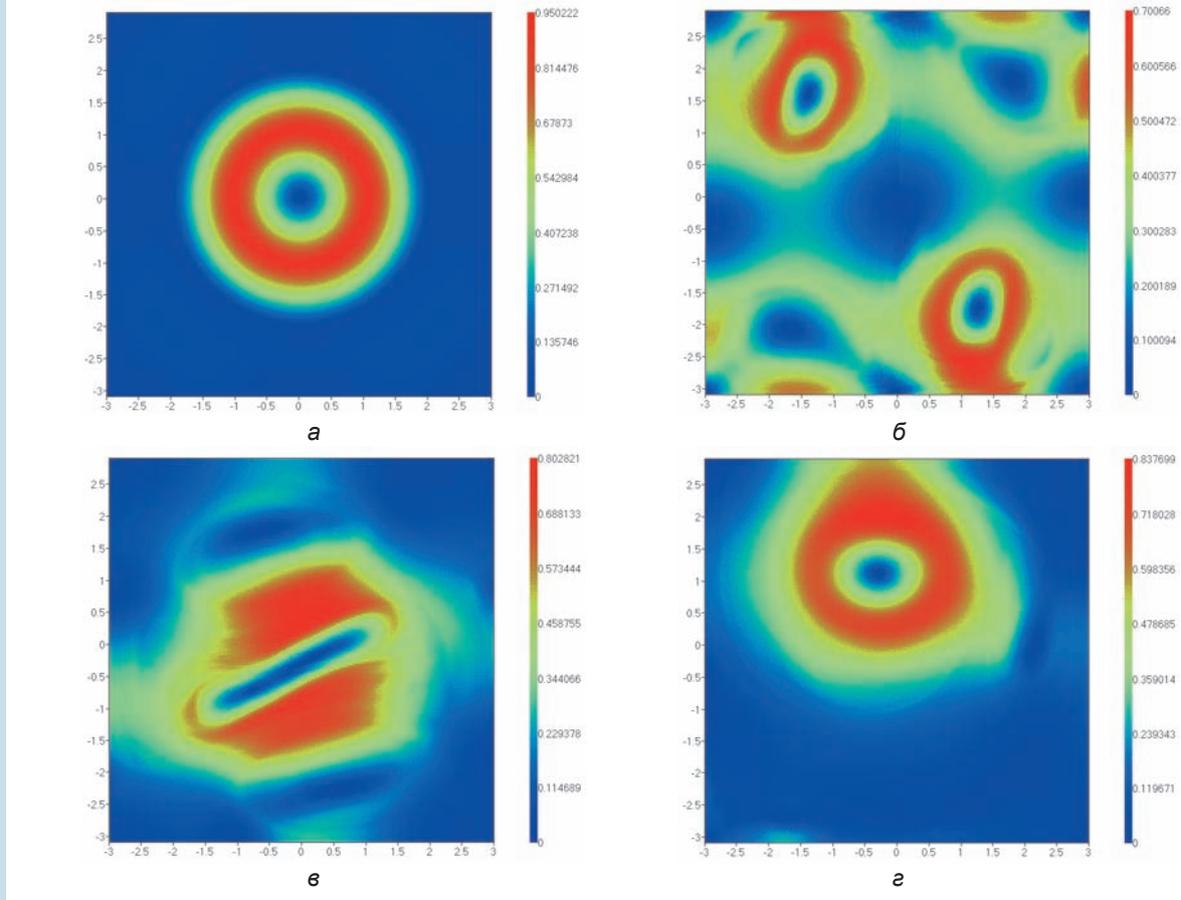
Использование ИС РБПО для связанных расчетов (нейтронно-термогидравлический расчет ЯЭУ)



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

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

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

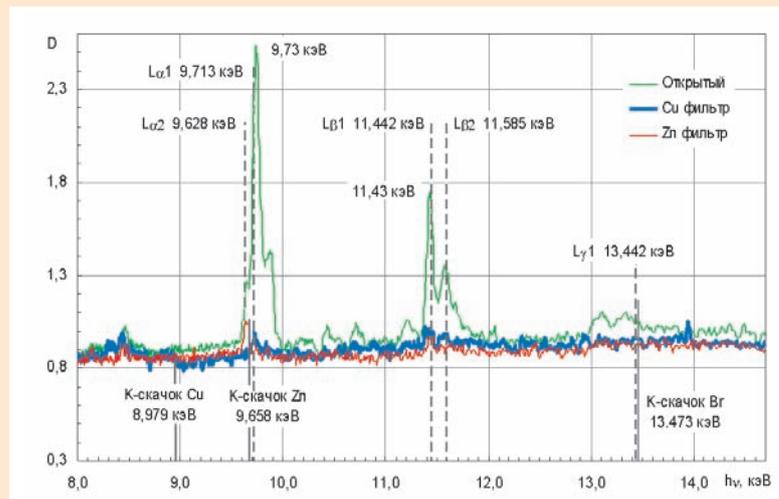


Пространственное распределение модуля скорости, полученное в расчете эволюции кругового вихря на моменты времени: а –  $t = 1$ ; б –  $t = 80$ ; в –  $t = 110$ ; г –  $t = 500$

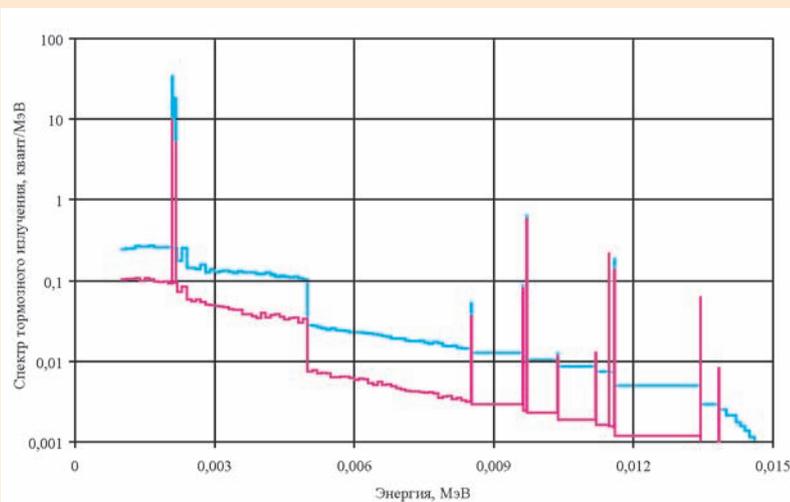
в диапазоне  $3 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. В большинстве опытов облучалась плоская золотая (Au) мишень. Предварительный анализ результатов регистрации показал, что наиболее яркие спектральные компоненты по положению на спектрограммах близки к линиям  $L\alpha_{1,2}$  и  $L\beta_{1,2}$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

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

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



Спектрограмма свечения Au с привязкой к энергетической шкале



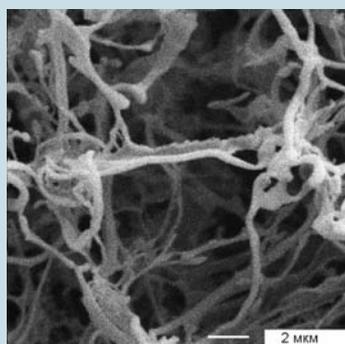
Спектральное распределение РИ при облучении потоком горячих электронов с энергией 15 кэВ (—) и 6,5 кэВ (—)

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

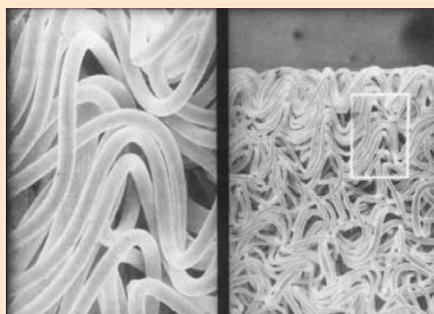
в область меньших расстояний и в распределении  $dE/dx$  появляется длинный «хвост», вызванный частью потока ионов, проходящей через слои с меньшей массовой толщиной вещества. В экспериментах на ускорителях ЭПП-10 (ВНИИЭФ) и Unilac (GSI, Дармштадт, Германия) энергетическое распределение потока ионов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

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

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



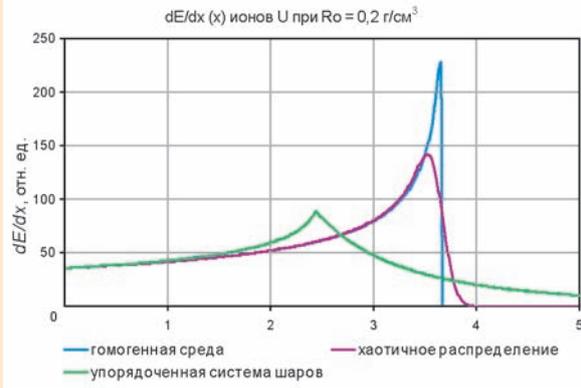
Микроструктура «пены»,  
 $\rho \approx 10^{-2} \text{ г/см}^3$



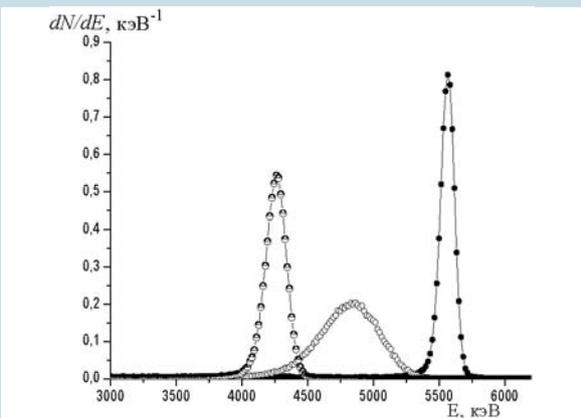
а

б

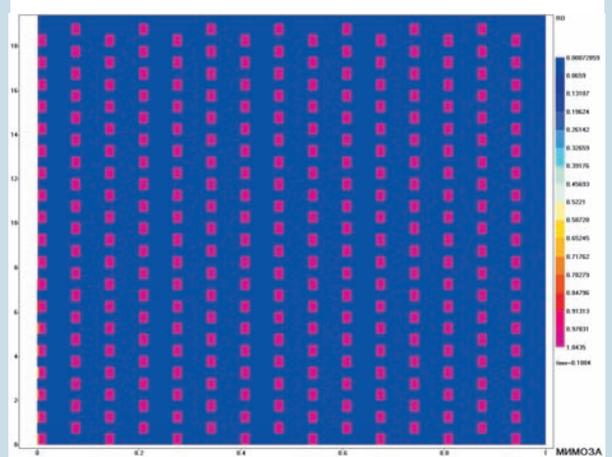
Пресс-материал из медной проволоки (а) и мишени на его основе (б)



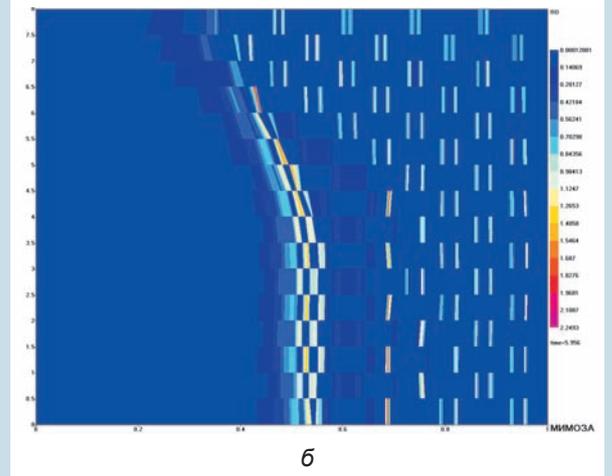
Расчетный профиль энерговыведения при торможении ионов в среде с высокой пористостью



Спектры протонов после прохождения плотных слоев ПММА-1 (●) и ПММА-2 (◐), а также пористой мишени с плотностью ~ 0,01 г/см³ (○) по результатам измерений на ускорителе ЭПП-10

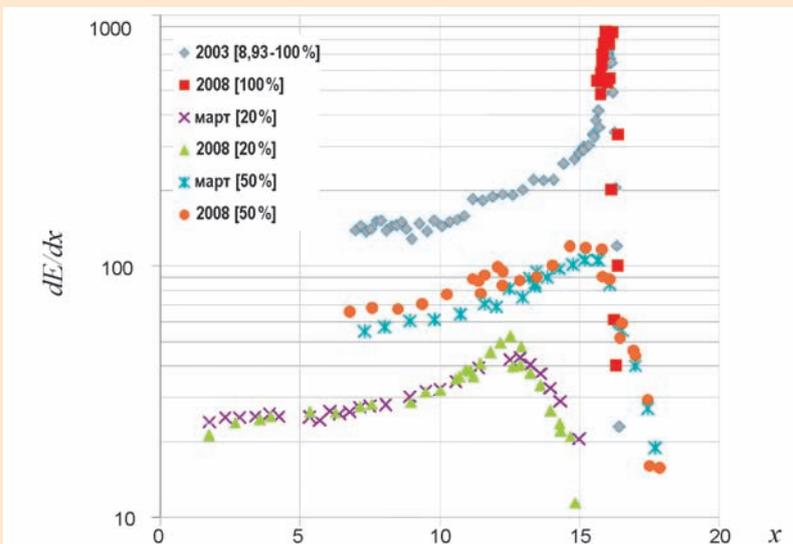


а



б

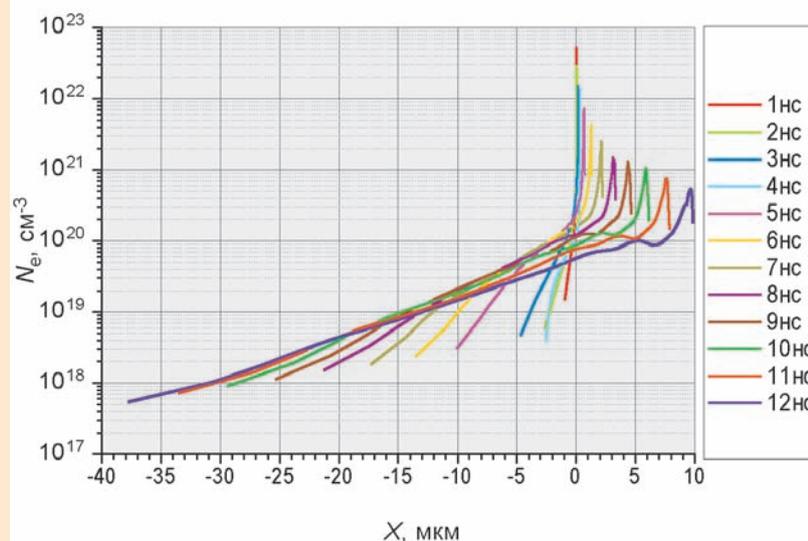
Распределение плотности в пористой среде до воздействия лазерного излучения (а) и в некоторый промежуточный момент времени (б)



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

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

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



Распределение плотности электронов по толщине мишени на различные моменты времени

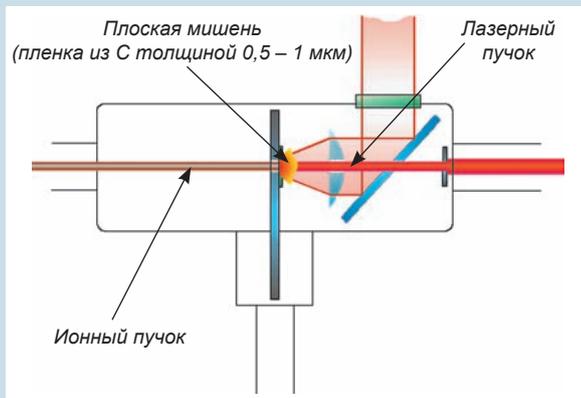
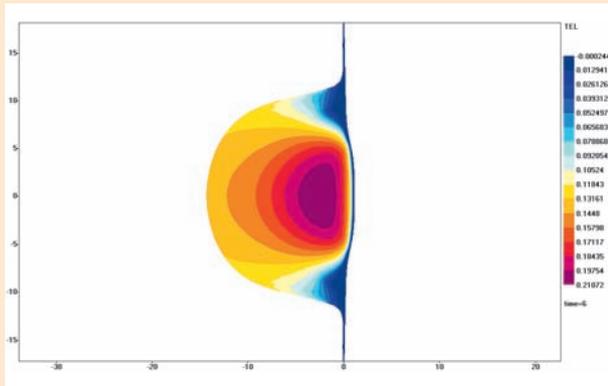
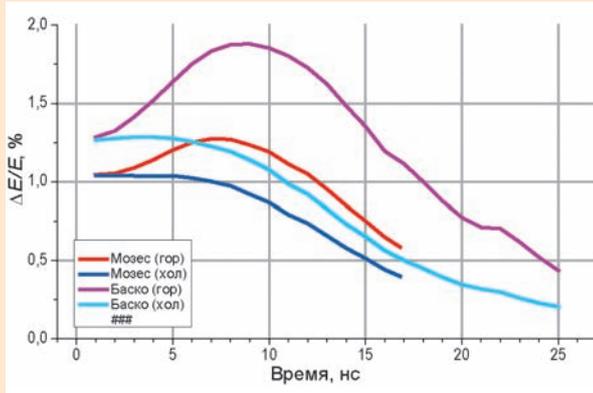


Схема экспериментов по исследованию взаимодействия потока ионов с лазерной плазмой



Пространственное распределение электронной температуры на момент середины лазерного импульса



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



Подготовка эксперимента