



## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

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

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

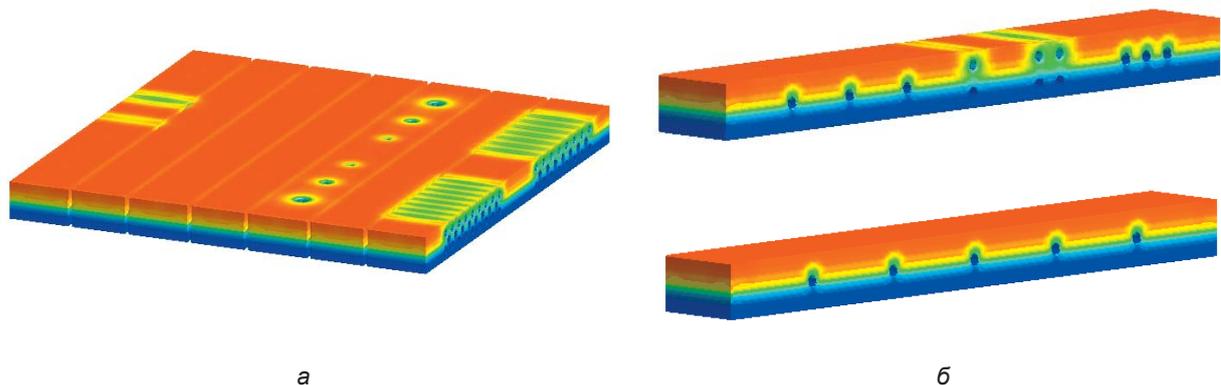
С целью повышения эффективности многопроцессорного счета в комплексе программ ЛЭГАК-3D реализован аппарат динамической балансировки вычислительной нагрузки на процессоры во время счета задачи, перераспределяющий счетные точки с процессора на процессор. Ранее реализован-

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

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

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

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



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

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

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

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

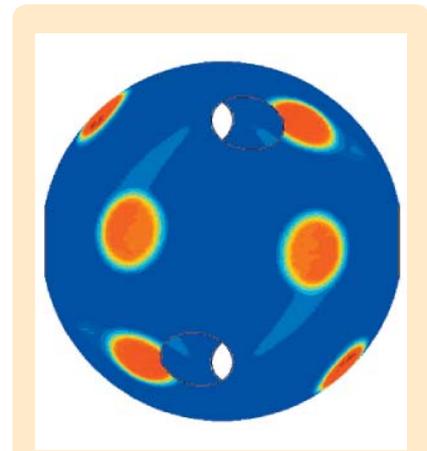
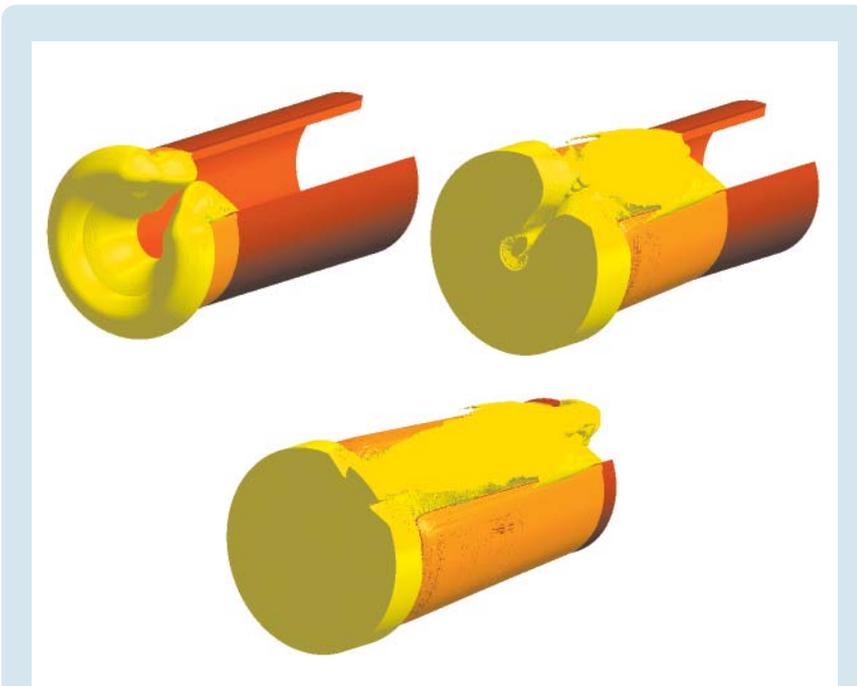


Схема лазерной освещенности внутренней поверхности сферического бокса в экспериментах на второй гармонике иодного лазера  $\lambda = 0,657$  мкм (резко выделяются зоны пятен первичной лазерной засветки)

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



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

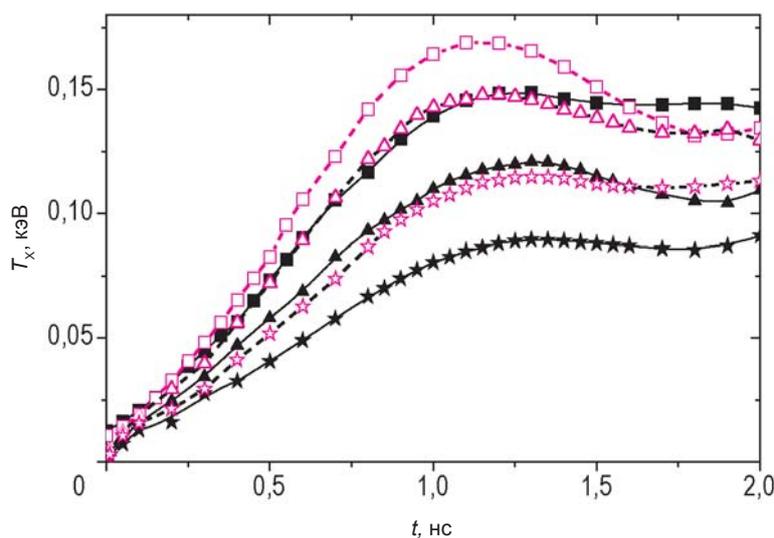


ент поглощения в пятнах первичной лазерной засветки снижается с 0,83 до 0,50, а максимальная температура рентгеновского излучения в боксе падает с 170 до 150 эВ. Среднеквадратичная неоднородность рентгеновской освещенности капсулы с термоядерным топливом в этих расчетах составляла 1–3 %. В экспериментах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

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

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

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



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

■, □ – Au; ▲, △ – Cu; ★, ☆ – Mg

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Основные результаты 2010 года:

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



и доступа состоит из следующих основных компонентов:

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

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

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

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

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

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

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

Получены следующие свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

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

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

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

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

3. Разработка базового ряда суперЭВМ, включающего в себя:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

– разработан и утвержден технический проект на высокопро-

изводительный вычислительный комплекс нового поколения;

– созданы инженерные системы жизнеобеспечения;

– ведутся работы по созданию системного ПО и его тестированию.

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



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

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

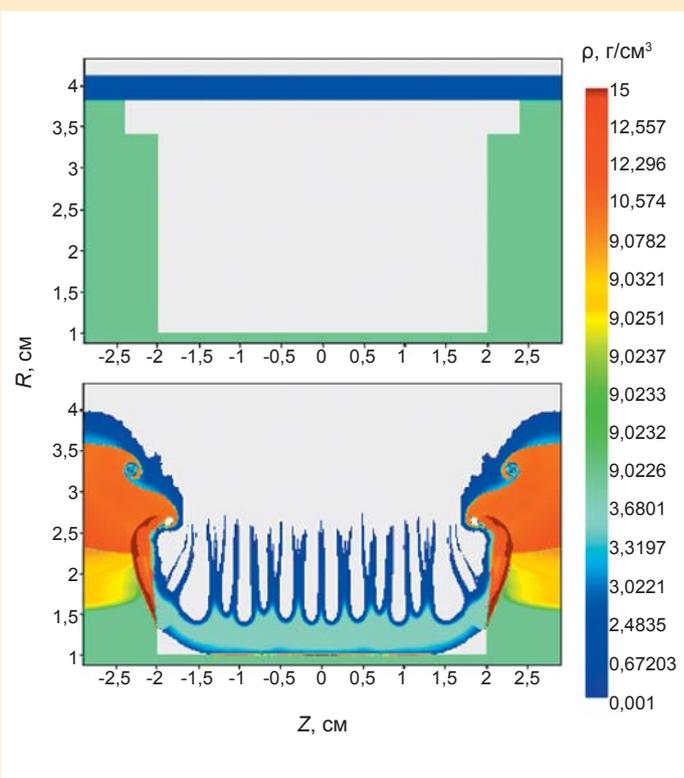
Наряду с универсальными компактными суперЭВМ в ИТМФ были разработаны экспериментальные образцы программно-аппаратных комплексов на базе специализированных компактных суперЭВМ. Эта работа выполнялась в рамках реализации государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям. Применение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

свойств материалов, находящихся в условиях мощного радиационного воздействия.

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



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

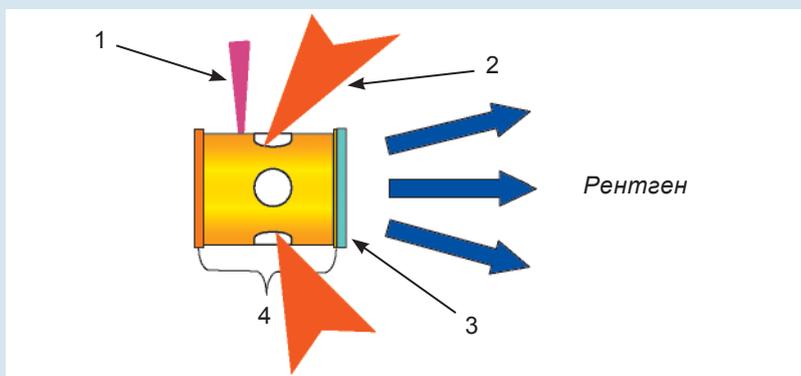


Изолинии плотности лайнерного ПУ до начала и в конце имплозии (расчет по методике МИД)

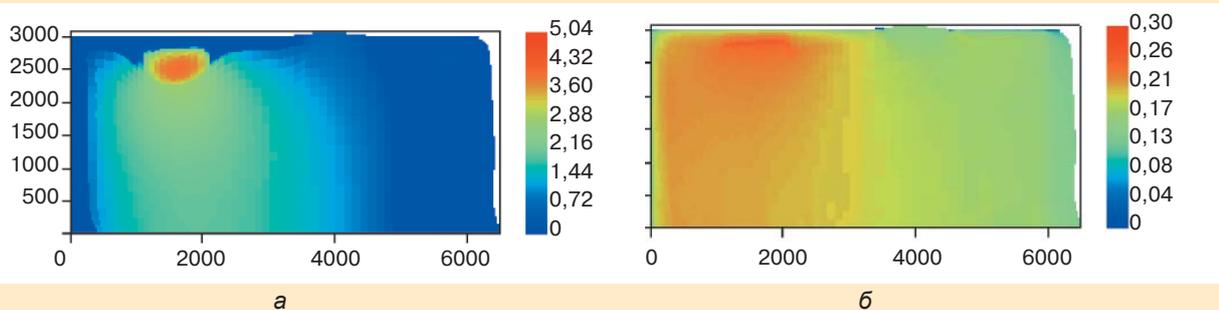
В РФЯЦ-ВНИИЭФ планируется строительство перспективной лазерной установки УФЛ с энергией в импульсе до 2 МДж. С целью подготовки программы предстоящих экспериментов и выполнения сравнительного анализа параметров излучения в различных вариантах установки проводились расчетные оценки параметров рентгеновского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

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

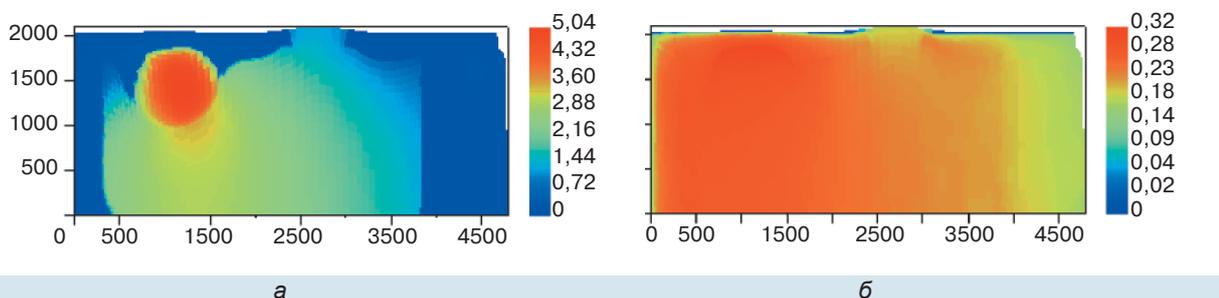
На лазерной установке «Искра-5» проводятся эксперименты по генерации ударных волн в различных материалах при непрямом (рентгеновском) облучении в мишенях типа «Иллюминатор». Выполнено расчетное моделирование опытов с расположением исследуемого материала (алюминий двух толщин) на торце мишени. Результаты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



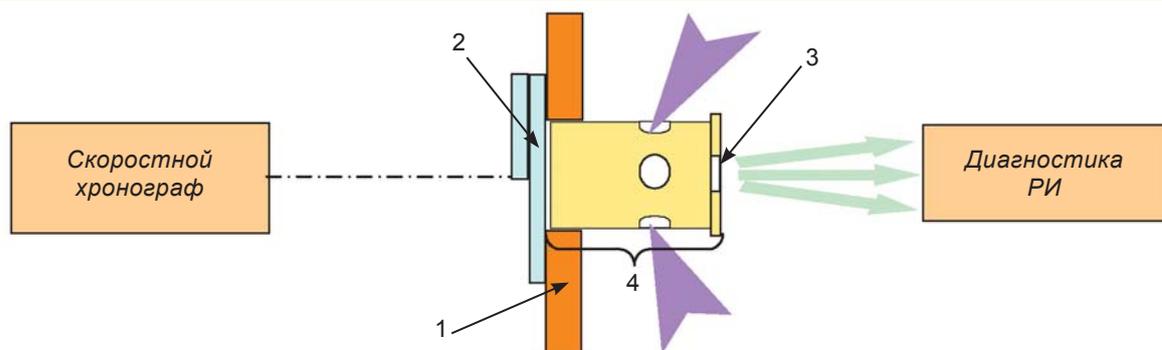
Мишень «Иллюминатор»: 1 – держатель; 2 – лазерные пучки; 3 – выходное окно; 4 – корпус



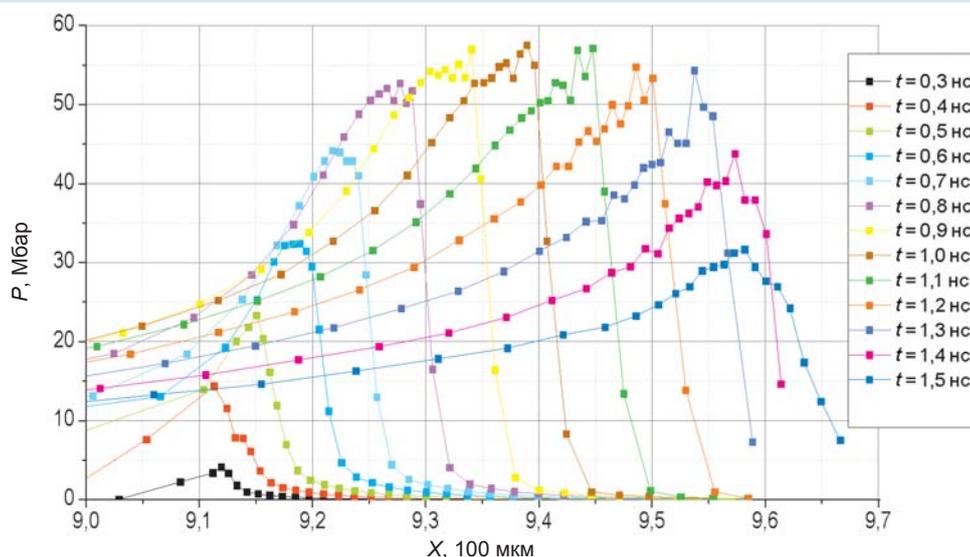
Пространственное распределение температуры электронов (а) и излучения (б) на момент середины лазерного импульса в расчете для второй гармоники



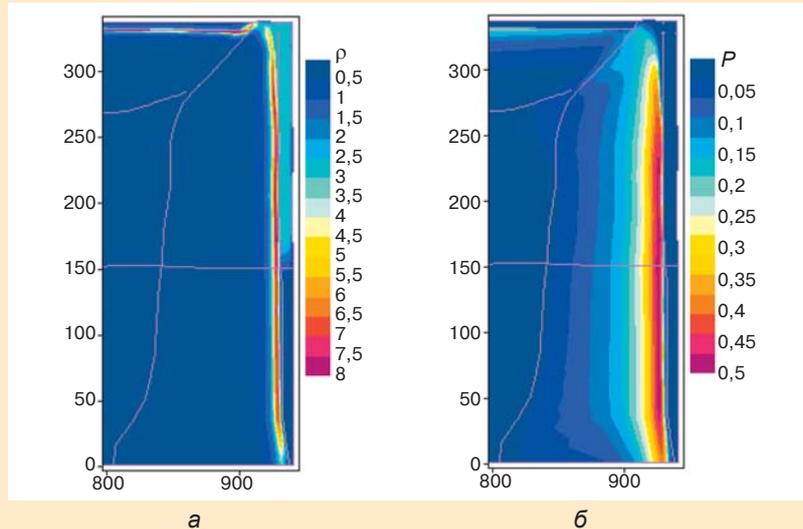
Пространственное распределение температуры электронов (а) и излучения (б) на момент середины лазерного импульса в расчете для третьей гармоники



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



Профили давления в алюминиевом слое из расчета МИММК



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

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

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

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

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

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

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

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

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

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

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

свойств элементов экспериментального устройства.

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