

## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

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

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

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

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

Основные характеристики методики и комплекса программ КОРОНА:

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

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

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

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

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

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

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

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

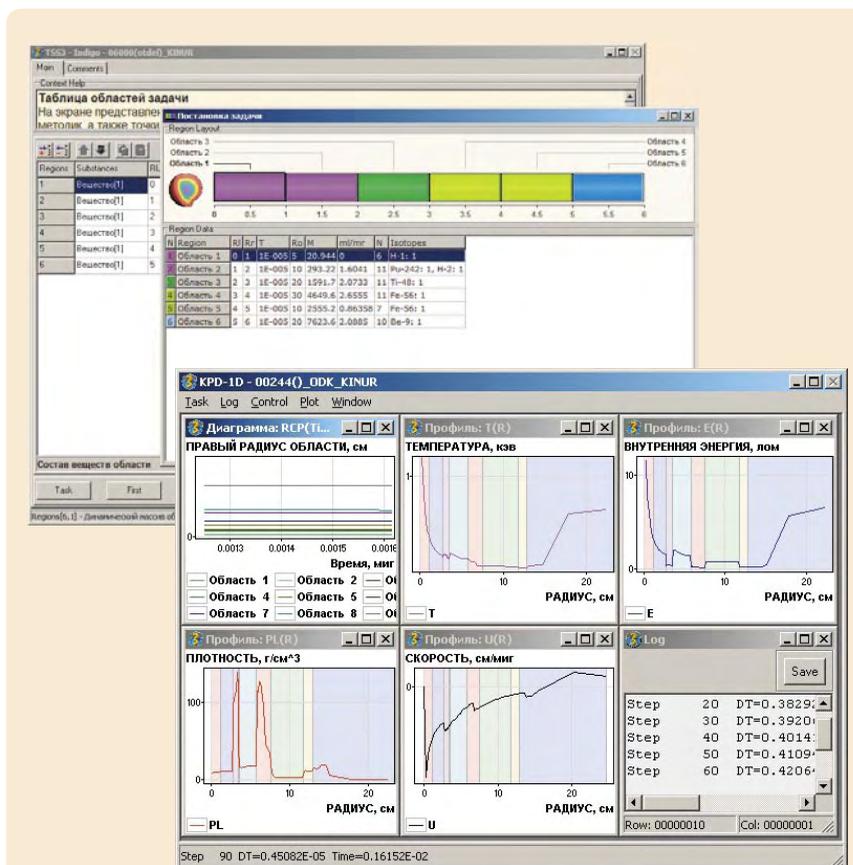
Сдан в эксплуатацию программный комплекс для расчетов в параллельном режиме двумерных газодинамических процессов одновременно с расчетом методом Монте-Карло переноса нейтронов и гамма-квантов, изменения энергии системы с использованием различных спектральных ядерно-физических данных. При расчете процесса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

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

Разработана методика СОЛЯРИС и создан программный комплекс для решения многомерных задач переноса излучения и теплопроводности с учетом газодинамического движения вещества и других физических процессов на многопроцессорных ЭВМ. Методика СОЛЯРИС предназначена для численного решения на многопроцессорных ЭВМ трехмерных задач переноса излучения и теплопроводности в произвольных областях с вакуумными полостями с учетом газодинамического движения вещества в оптически плотных слоях и других физических процессов, сопровождающих эти явления. Поставленные задачи

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

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

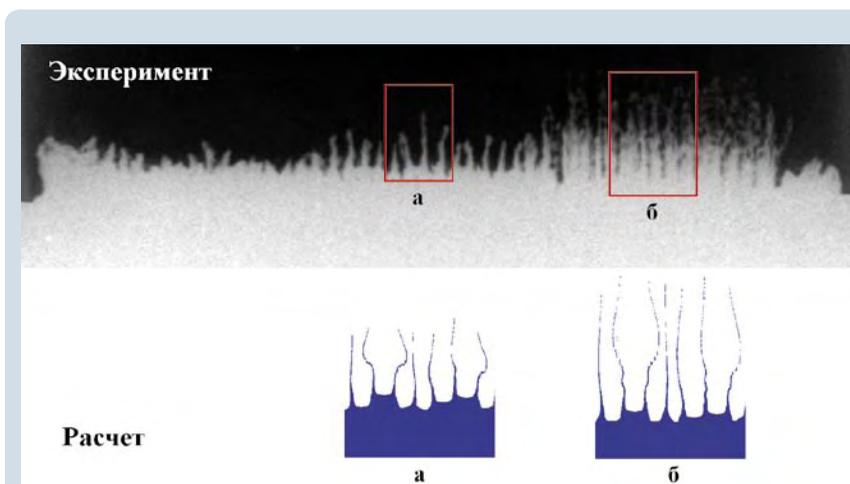


Задание входной информации к расчету по комплексу одномерных программ и динамической визуализации различных величин в процессе счета задачи

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

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

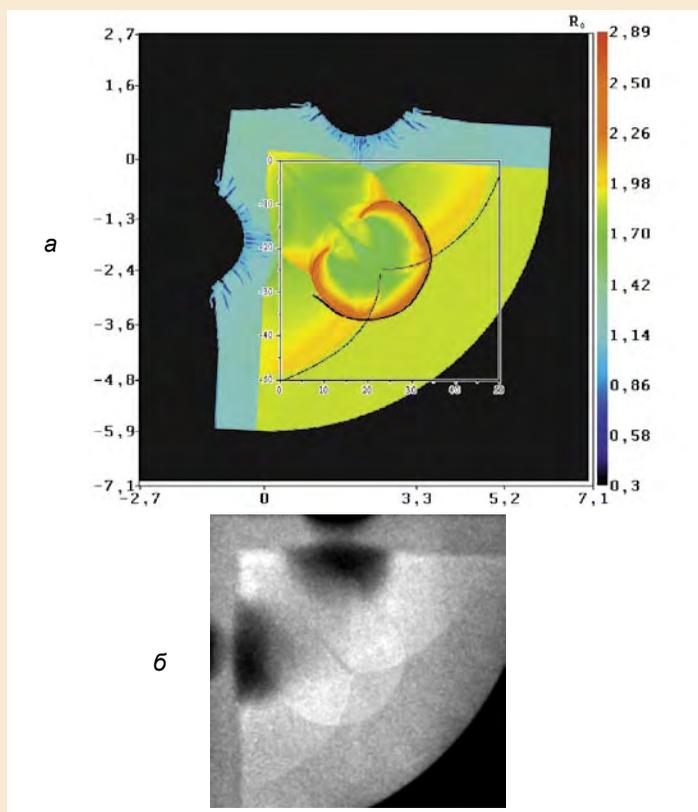
В методике ЛЭГАК были подобраны параметры модели кинетики МК для ВВ на основе октогена и воспроизведена двумерная картина, полученная в рентгенографических опытах, проведенных в ИФВ. В экспериментах исследовалось изменение ударно-волновой чувствительности при взаимодействии



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

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

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



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

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

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

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

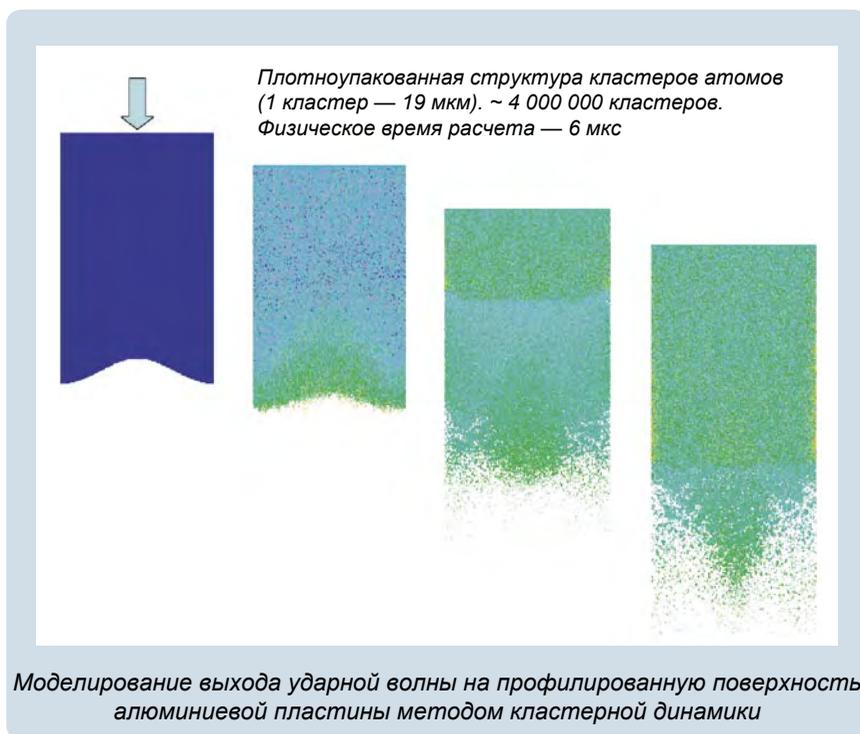
уравнениях Максвелла производных по угловым переменным существенно увеличивает интервал по времени, на котором решение уравнений высокочастотного приближения хорошо согласуется с решением исходных уравнений.

Продолжалось интенсивное развитие методик молекулярно-динамического моделирования МД:

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

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

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

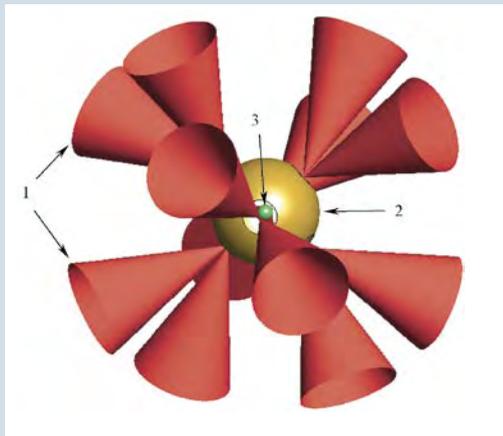


численной методики СНД-ЛИРА проведены расчеты динамики полей излучения (рентгеновского и лазерного) в цилиндрических боксах-конверторах. Неоднородность облучения капсулы с

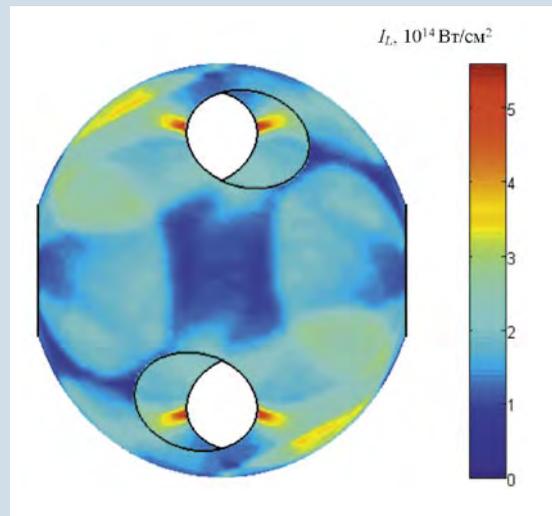
термоядерным топливом в этих экспериментах оказывается существенно выше.

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

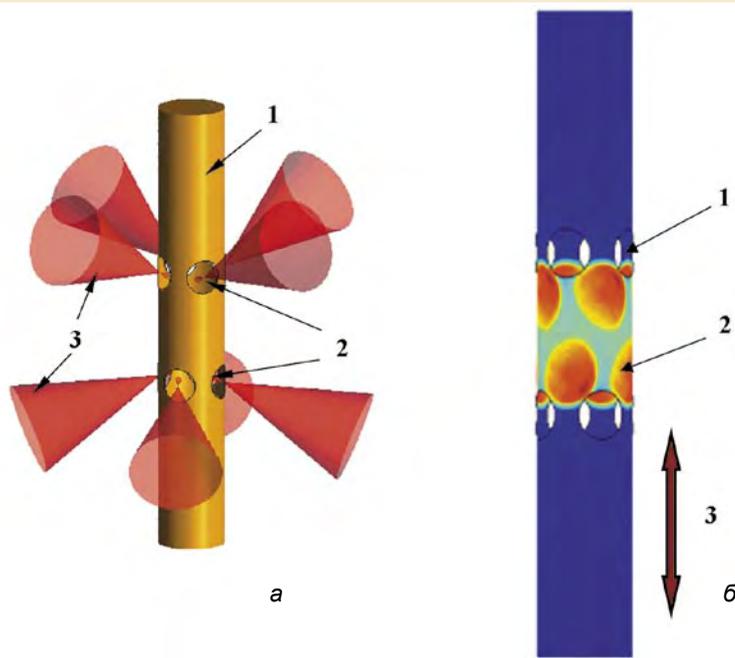
связанным с совершенствованием баз ядерно-физических данных, данных по уравнениям состояния веществ и пробегам излучения. Так, в интересах усовершенствования моделей



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



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



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

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

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

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

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

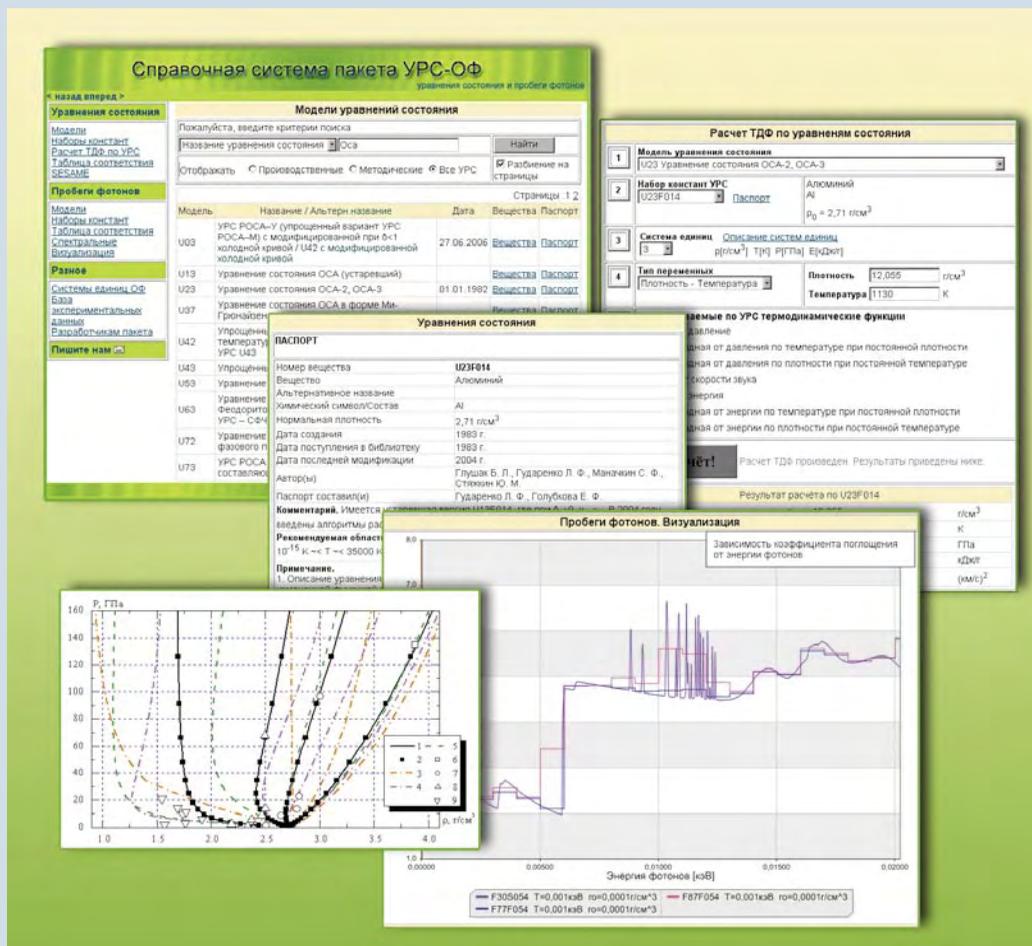
Выполнены следующие работы, направленные на усовершенствование сервиса пакета УРС-ОФ:

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

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

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

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



Пример работы с графической справочной системой пакета УРС-ОФ

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

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

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

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

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

щей памятью, отлажена работа библиотеки на большом числе процессоров.

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

В 2007 году проведена реконструкция ВЦ, обеспечивающая размещение высокопроизводительных вычислительных систем на площади около 3000 м<sup>2</sup>, надежное электропитание и охлаждение энергоемких вычислительных установок на базе первичного электроснабжения мощностью до 9 МВт.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В 2007 году во ВНИИЭФ разработаны:

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

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

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

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

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

почке уравнений, описывающих турбулентное перемешивание с переходом в гомогенное.

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

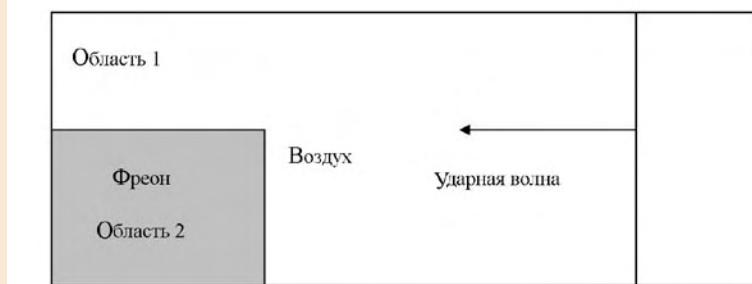
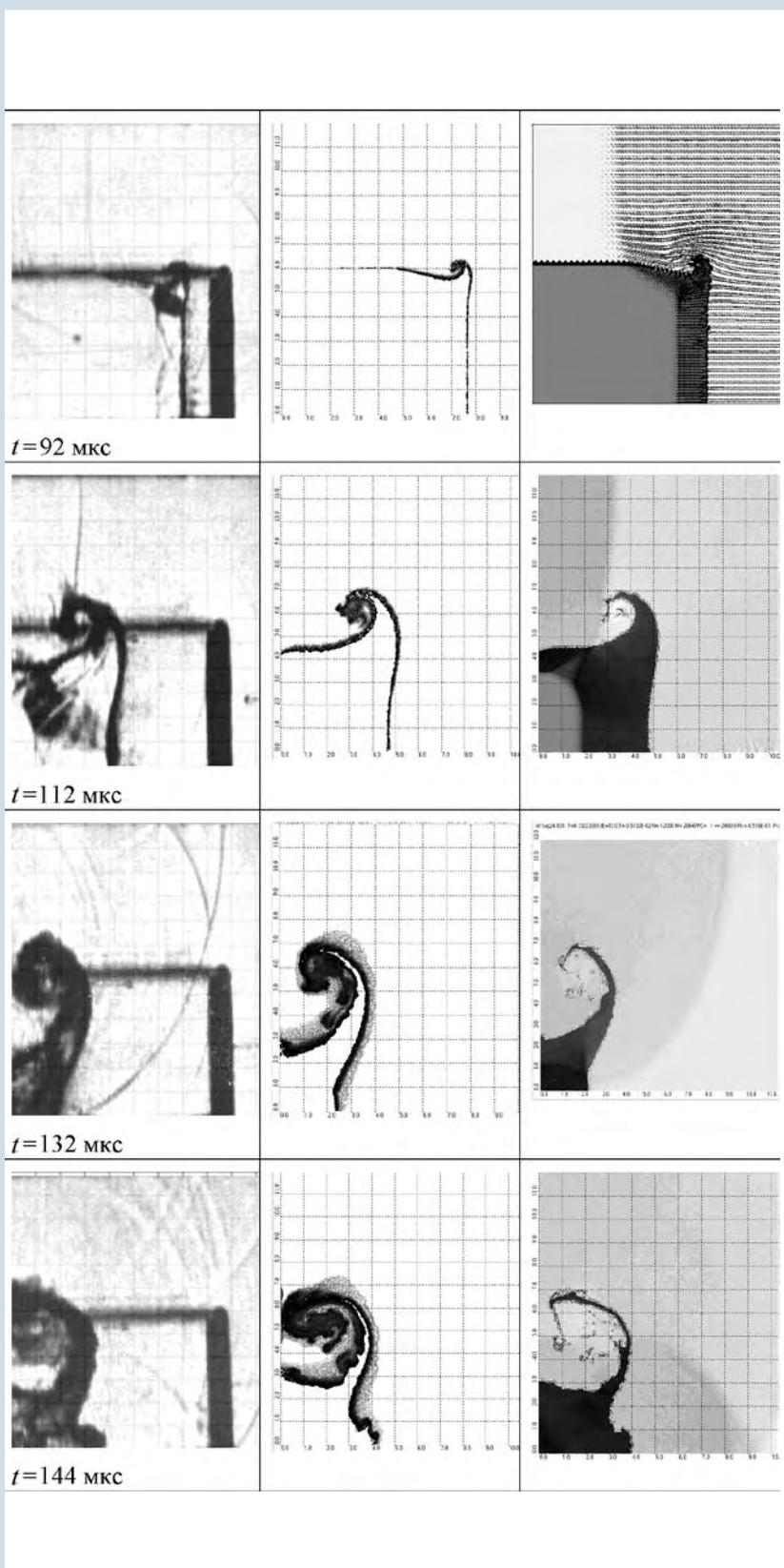


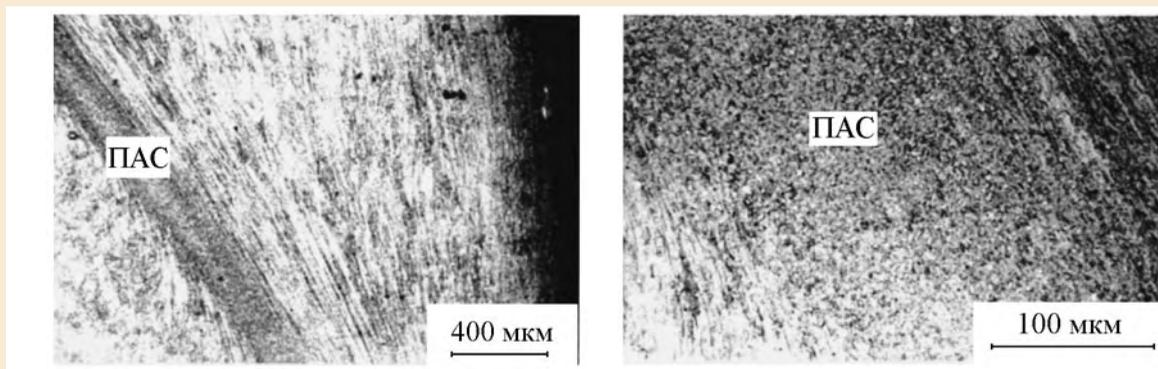
Схема эксперимента по обтеканию «тяжелого» угла



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

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

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



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

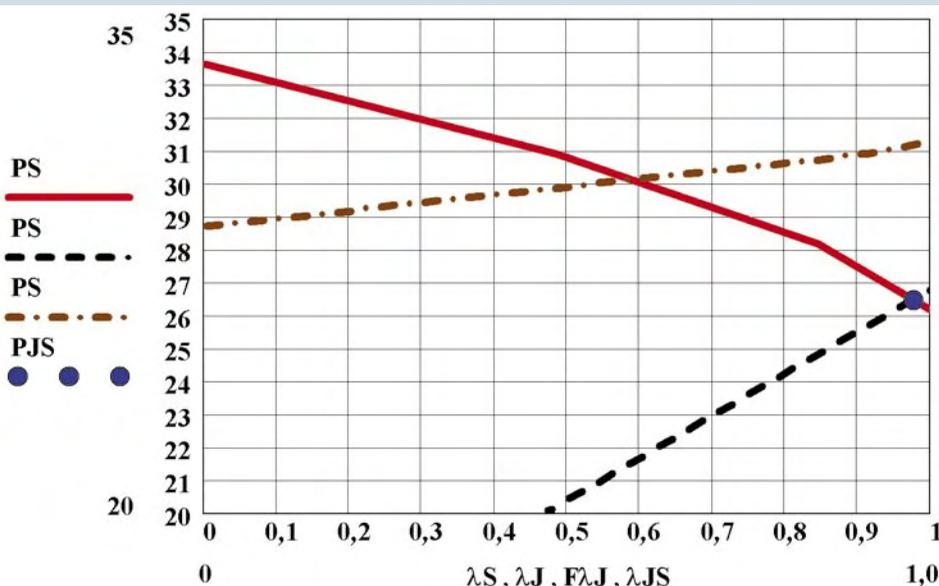
ляет определить положение на этом профиле точки Жуге в виде двух независимых параметров  $\{\lambda_J, P_J\}$  — выгорания в точке Жуге и давления в этой точке. Выгорание в точке Жуге может быть меньше 1,0, тогда часть ВВ выгорает за точкой Жуге, и эта часть определяет переменную долю выделения энергии,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

С помощью методик ЭГАК и ТРЭК исследовалось развитие турбулентного перемешивания и регулярного локального возмущения (ЛВ) на границе раздела воздух-SF<sub>6</sub>. Число Маха распространяющейся в ударной трубе волны в SF<sub>6</sub> от 1,7 до 9,1. Рассмотрены случаи с ЛВ различной формы: в виде треугольной «канавки» и полуцилиндра. Расчеты проводились с помощью прямого 2D и 3D численного моделирования. Получено:

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

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

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



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

для ширины ЗТП и турбулентной скорости;

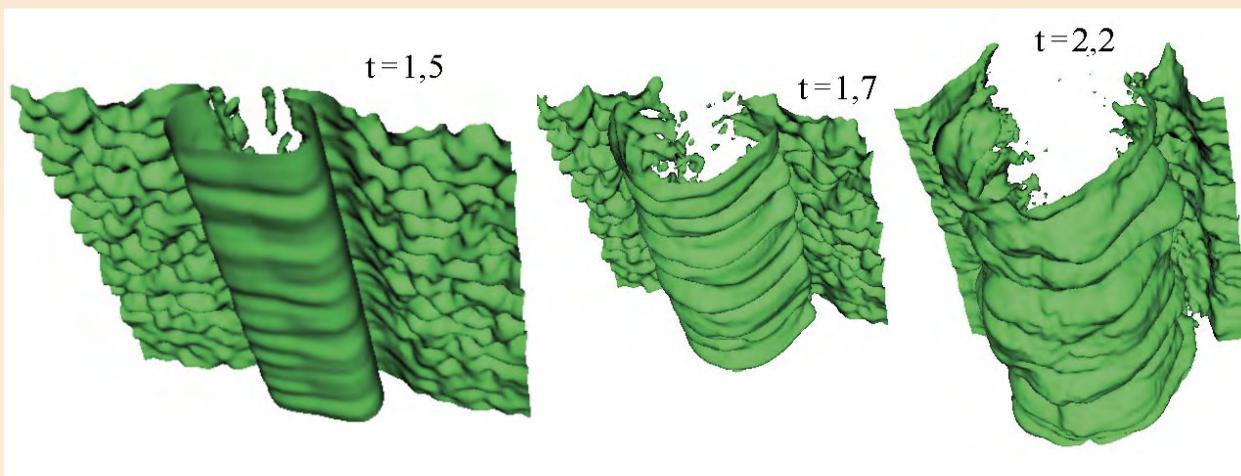
— анизотропия пульсаций скорости в ЗТП уменьшается со временем, оставаясь значительной;

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

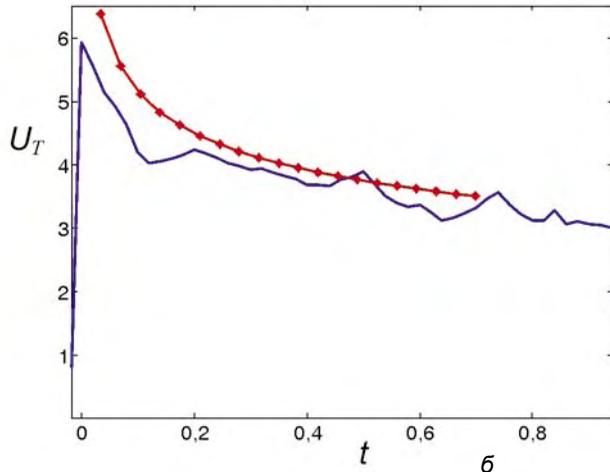
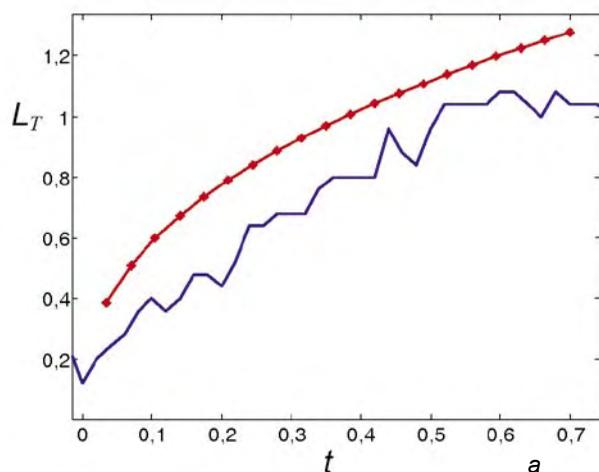
ударной волны при ее движении по  $SF_6$ . При числе  $M_{yB} = 2,6 - 2,7$  указанные значения сравнимы, а при  $M_{yB} = 6,1$  передние кромки ЗТП и ЛВ практически сливаются с фронтом ударной волны. Сказанное относится к конкретной постановке опыта. Если протяженность области  $SF_6$  сделать достаточно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

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

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



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



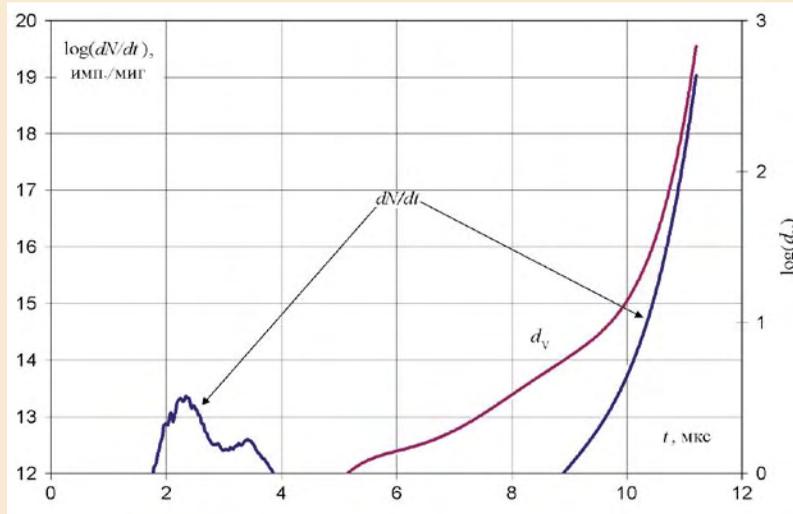
Зависимости от времени ширины ЗТП (а); турбулентной скорости (б):

— 2D-расчет; — теоретическая оценка

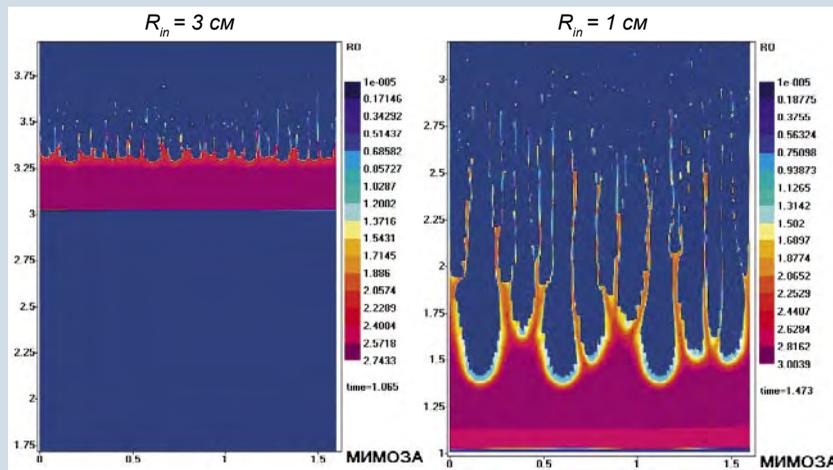
позволяет снизить потери энергии, связанные с наличием примесей, и увеличить время жизни плазмы до  $\sim 10$  мкс. Появляется возможность существенного увеличения нейтронного выхода (до  $\sim 10^{18} - 10^{19}$ ) при объемном сжатии плазмы  $\sim 10^3$ , что соответствует критерию Лоусона — термоядерная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

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

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



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



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

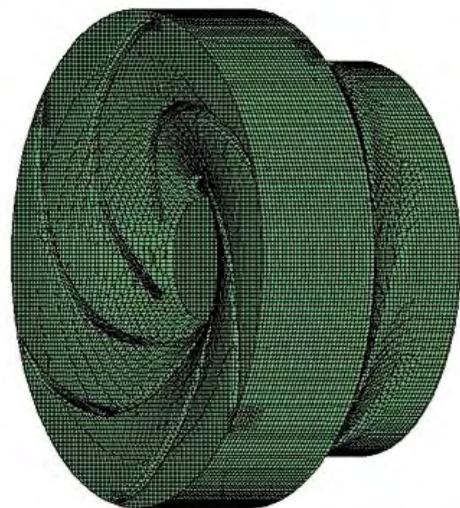
ния. Связь между программами газодинамики и анализа НДС обеспечивается специализированным модулем, который выполняет обмен граничными условиями и морфинг (деформацию) расчетной сетки. Работоспособность модуля продемонстрирована на примере сквозных расчетов задач аэроупругости в квазистатическом приближении.

Усовершенствован ряд алгоритмов и модулей комплекса:

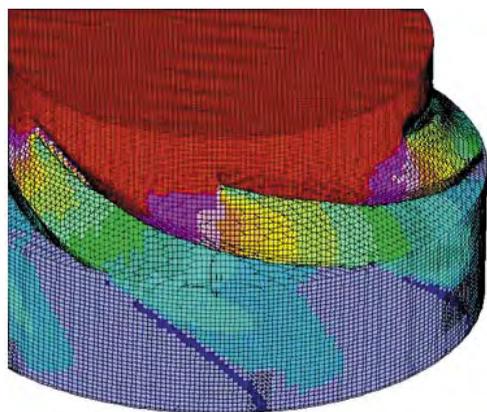
- Разработан и внедрен метод решения уравнений Навье — Стокса на сетках, состоящих из многогранников с произвольным числом граней.

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

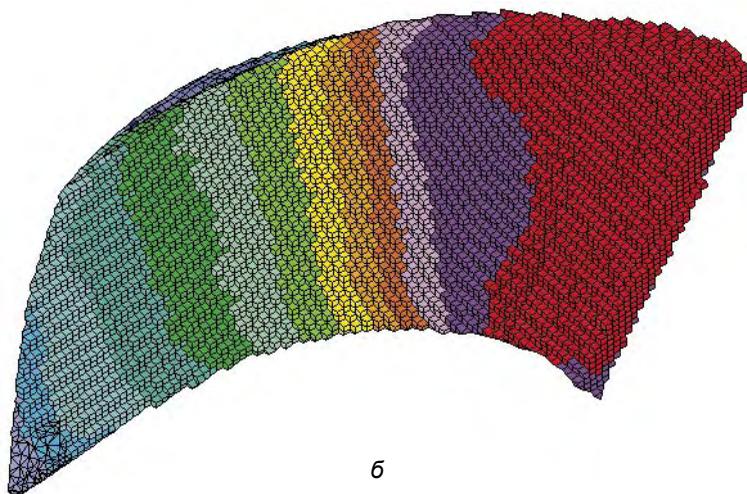
- В модуль анализа НДС введен учет температурного нагружения.



Расчетная сетка в области рабочего колеса насоса



а



б

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

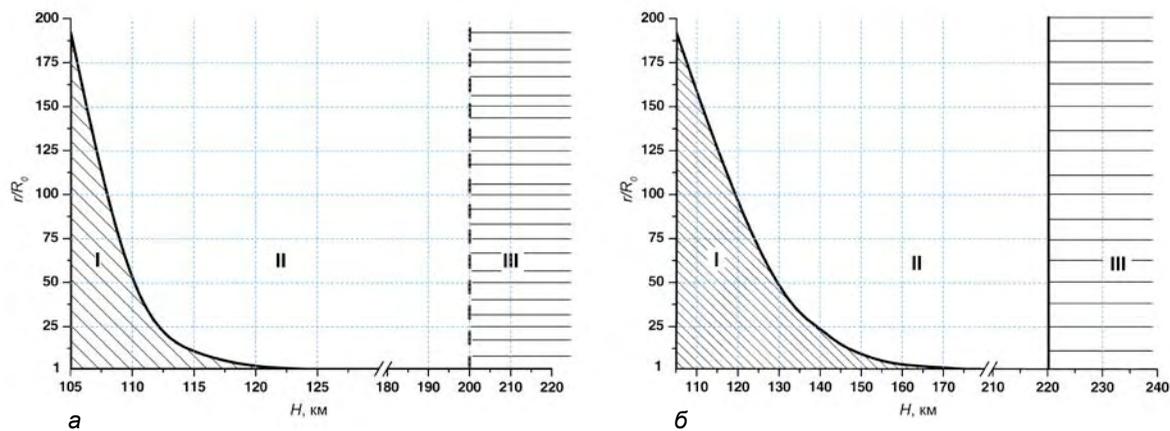
В 1962 году на высоте 400 км (над островом Джонстон в Тихом океане) американцы произвели ядерный взрыв мощностью 1400 кт (операция «Starfish»). В публикациях, описывающих этот взрыв, сообщалось, что в северной магнитосопряженной области в момент времени  $t \approx 60$  мс зарегистрировано значительное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

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

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

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

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



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

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

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



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