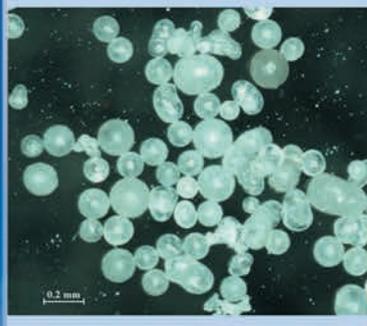
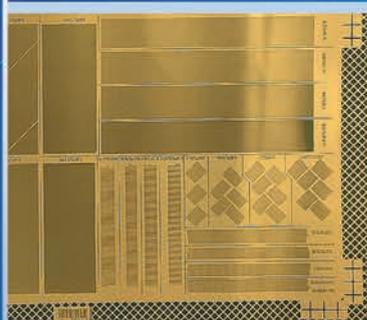
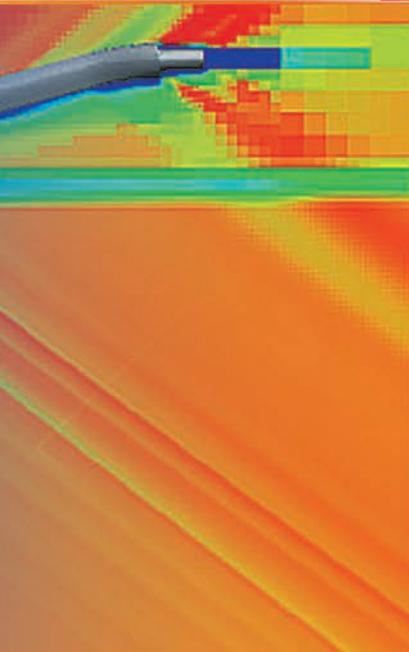
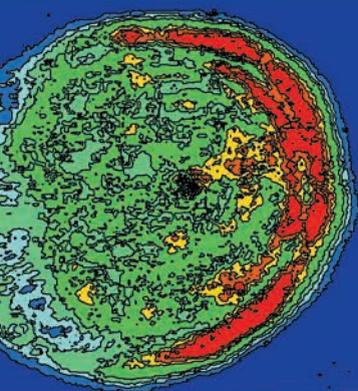


# ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

# 2022



САРОВ  
2023

# ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕХ РЯЦ-ВНИИЭФ

www.vniief.ru

ИПЦ готов выполнить для вас полный цикл полиграфических работ – от предоставления клиентам оригинальных идей до изготовления тиража. Новая технологическая линия полноцветной печати позволяет продукции ИПЦ быть конкурентоспособной на российском рынке многокрасочной печатной продукции.

Продукция ИПЦ – научно-технические сборники трудов ученых Ядерного центра, материалы конференций, совещаний, научно-популярные журналы, книги, справочники, учебники для вузов, рекламные буклеты, календари, бланки, визитки, листовая продукция.

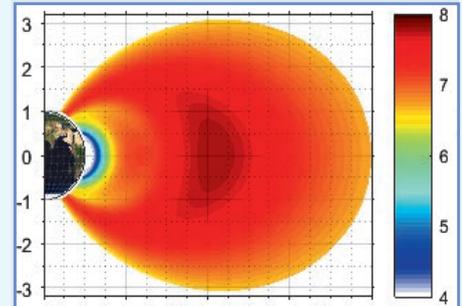
Заказать нашу продукцию можно:

- по телефону 8(83130) 7-54-34
- по электронной почте [postmaster@otd68.vniief.ru](mailto:postmaster@otd68.vniief.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

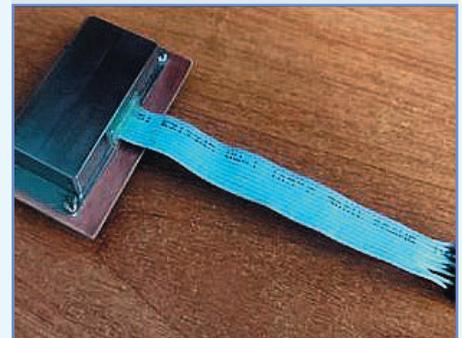
2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
(ИТМФ)



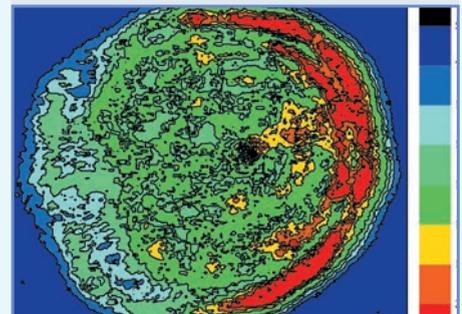
20

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА  
(ИФВ)



28

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)



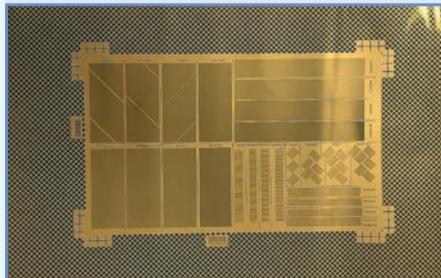
32

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)



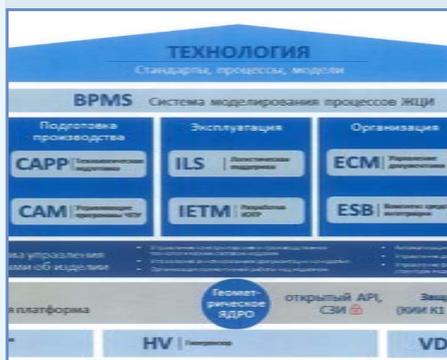
36

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СИСТЕМ им. Ю. Е. Седакова  
(НИИС)



34

ИНСТИТУТ ЦИФРОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ (ИЦТ)



35

КОНСТРУКТОРСКИЕ  
БЮРО



#### РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА

*д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев*  
*академик РАН Р. И. Ильяев*  
*академик РАН В. П. Незнамов*  
*канд. физ.-мат. наук В. В. Хижняков*  
*академик РАН С. Г. Гаранин*  
*чл.-корр. РАН Н. В. Завьялов*  
*канд. физ.-мат. наук А. О. Бликов*  
*д-р физ.-мат. наук А. В. Ивановский*  
*Е. В. Куличкова*  
*д-р техн. наук А. Л. Михайлов*  
*д-р физ.-мат. наук В. А. Разуваев*  
*чл.-корр. РАН В. Д. Селемир*  
*чл.-корр. РАН Р. М. Шагалиев*

РЕДАКТОР *Н. Ю. Зимакова*

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДГОТОВКА  
ОРИГИНАЛА-МАКЕТА *Е. Л. Соседко*

Подписано в печать 15.03.2023 г., Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,7. Уч.-изд. л. ~ 5,1.  
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 2349-2022.  
Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл.,  
ул. Силкина, д. 23

## ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Основным направлением деятельности теоретических и математического подразделений ИТМФ является создание современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов прежде всего в задачах механики сплошных сред и физики высоких плотностей энергий, но также и других задачах, входящих в основную тематику деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В 2022 г. усилия специалистов математического отделения ИТМФ были сосредоточены на разработке, создании и совершенствовании математических методик и внедрении их в комплексы программ для эффективного компьютерного моделирования задач в многомерной постановке на вычислительных системах нового поколения. Активно развивались технологии высокопроизводительных вычислений в интересах их внедрения в высокотехнологичные отрасли промышленности, осуществлялись работы по развитию осваиваемой продуктовой линейки.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ВНЕДРЕНИЮ ИХ В КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

В 2022 г. в математическом отделении анализировалась эффективность методов сквозного счета применительно к такой актуальной и быстро развивающейся прикладной области вычислительной аэрогазодинамики, как моделирование турбулентных течений с помощью вихреразрешающих подходов. В таких подходах задачи всегда решаются в трехмерной нестационарной постановке на

подробных сетках, что требует больших затрат вычислительных ресурсов и, следовательно, повышенных требований к эффективности применяемых расчетных методов.

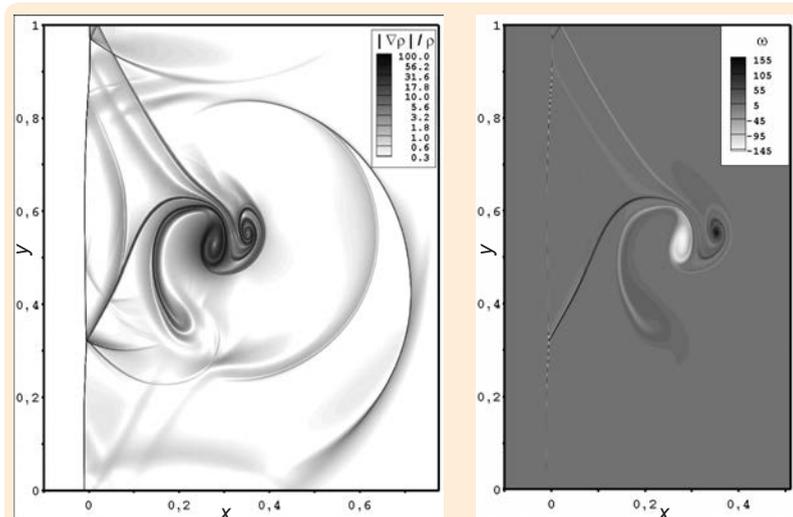
Среди множества приложений вихреразрешающих подходов выделяется класс задач, в которых турбулентный поток взаимодействует с ударной волной, при решении которых исследователи сталкиваются с дилеммой: с одной стороны, численные методы, рассчитывающие такие течения, должны обладать надлежащей диссипацией, чтобы подавлять нефизические осцилляции решения вблизи разрывов; с другой стороны, они не должны подавлять моделируемые вихри в турбулентном потоке. Поэтому выработка оптимальных алгоритмов расчета данного класса задач является серьезной проблемой, преодоление которой невозможно без тщательной отработки методик на последовательности тестовых задач, для которых могут быть получены эталонные решения.

Одной из таких задач является двумерная задача о взаимодействии вихря с ударной

волной – задача SVI (Shock-Vortex Interaction), в которой одиночный цилиндрический вихрь проходит через изначально плоскую ударную волну. Была выбрана постановка задачи SVI, при которой ударно-волновая структура течения остается устойчивой; получено эталонное решение на выбранной постановке с максимально возможным сеточным разрешением; проведен сопоставительный анализ точности отобранных методов сквозного счета; дана оценка их порядка сходимости к эталонному решению по нескольким локальным и интегральным параметрам.

В результате было показано, что в тестовой задаче SVI методы повышенного порядка аппроксимации не дают явных преимуществ перед методами второго порядка.

На сегодняшний день является актуальной задача создания достаточно точного и экономичного по затратам календарного времени численного метода решения трехмерного уравнения теплопроводности, возможности которого не ограничиваются прямоугольными сетками.



Эталонное решение задачи SVI: численная шпирен-визуализация (слева) и поле завихренности (справа)

Численный метод для решения трехмерного уравнения лучистой теплопроводности на прямоугольных структурированных сетках, основанный на разностной схеме расщепления, был реализован в методике ЛЭГАК и хорошо зарекомендовал себя в решении многих задач, представляющих практический интерес.

Однако существуют классы задач, результаты расчетов которых на прямоугольной пространственной сетке могут оказаться неудовлетворительными по точности или временным затратам. К ним относятся задачи, решение которых во многом определяется процессами лучистой (нелинейной) теплопроводности. Для адекватного описания решения таких задач в окрестности фронта тепловой волны требуется весьма подробная пространственная сетка, ориентированная в направлении распространения волны. Попытка обеспечить нужные размеры кубических ячеек эйлеровой сетки приводит к неоправданно большому количеству ячеек во всей задаче. При этом сетка будет излишне подробной и в областях гладкого решения, где это не требуется. Количество ячеек можно существенно уменьшить без потери точности, если выбирать нужную степень подробности сетки в зависимости от локальных особенностей решения задачи, что невозможно на прямоугольных сетках. Такого типа расчеты можно проводить на подвижной лагранжево-эйлеровой сетке или на эйлеровой неподвижной сетке с непрямоугольными шестиугольными ячейками.

В ИТМФ разработан численный метод решения трехмерного уравнения лучистой теплопроводности на структурированной непрямоугольной сетке, состоящей из произвольных шестигранников с линейчатými гранями. Получены

формулы для объема ячейки и вектора нормали в центре грани ячейки; линейаризованная система разностных уравнений для итерационного решения нелинейных уравнений теплового баланса; алгоритм вычисления тепловых потоков на гранях ячеек сетки; формулы, выражающие коэффициенты при искомым значениях температуры в ячейках сетки через коэффициенты при температурах в формулах для потоков. Показано, что в предложенном методе барицентрические координаты точек, в которых определяются интерполированные температуры для вычисления тепловых потоков, можно получить еще до вычисления декартовых координаты этих точек, что значительно упрощает вычисления.

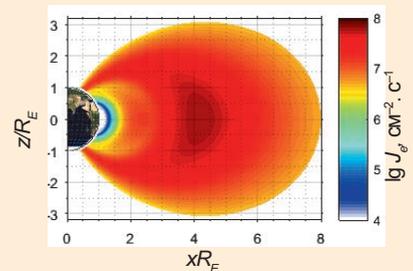
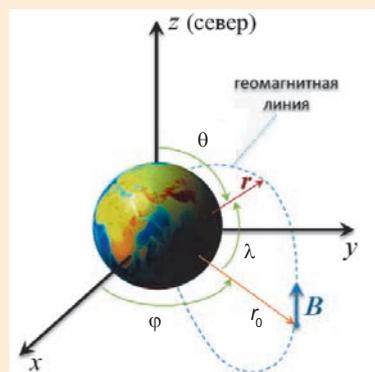
В результате тестовых расчетов установлено, что разработанный численный метод по точности и времени расчета решения трехмерного уравнения лучистой теплопроводности на структурированной непрямоугольной сетке, состоящей из произвольных шестигранников с линейчатými гранями, дает удовлетворительные результаты.

Радиационные пояса Земли (РПЗ) – один из основных факторов, обуславливающих характеристики околоземных кос-

мических аппаратов. Для прогнозирования воздействия РПЗ на космические аппараты при различных условиях сотрудники ИТМФ разработали две методики, которые представили научной общественности на конференции «Супервычисления и математическое моделирование» (Саров, 2022 г.). Методики предназначены для использования на высокопроизводительных (многопроцессорных) вычислительных системах.

Первая методика – стохастическая, основанная на методе Монте-Карло, описывает динамику релятивистских электронов РПЗ в приближении ведущего центра и позволяет моделировать релаксацию сравнительно быстро протекающих возмущений в РПЗ (например, вызванных геомагнитным штормом) в области низких орбит. Учитывается торможение, рассеяние релятивистских электронов РПЗ на частицах атмосферы, а также их радиальная диффузия, вызванная медленными пульсациями электромагнитного поля. Модель геомагнитного поля представляет собой стационарный эксцентричный диполь.

Вторая методика использует сеточный подход в трехмерном пространстве адиабатических инвариантов и позволяет моделировать РПЗ на длитель-



Распределение всенаправленного потока релятивистских электронов РПЗ в осевой плоскости Земли во время спокойных геомагнитных условий, рассчитанное в системе геомагнитных координат

ных временных масштабах в зависимости от космической погоды. Учитываются следующие физические эффекты, влияющие на динамику частиц РПЗ: адиабатическое удержание геомагнитным полем, торможение и рассеяние на частицах атмосферы, вызванная пульсациями электрического и магнитного поля радикальная диффузия, рассеяние электромагнитными волнами в магнитосфере (излучение искусственного происхождения, свистящие атмосферники от молний, хор свистящих атмосферников, плазмосферный шум, электромагнитные ионноциклотронные волны).

С помощью данных методик возможен также расчет характеристик электронных потоков РПЗ, воздействующих на околоземные космические аппараты вдоль траектории их движения. Программный модуль расчета траекторий основан на приближении невозмущенного (кеплеровского) движения и учитывает несферичность Земли.

В 2022 г. рассмотрены явные  $m$ -стадийные симплектические разностные схемы Рунге – Кутты – Нистрема (RKN), предназначенные для численного решения натуральных гамильтоновых систем обыкновенных дифференциальных уравнений с распадающимися (натуральными) гамильтонианами  $H(r, p)$  для решения, в частности, задач молекулярной динамики, небесной механики и астрофизики.

На сегодняшний день наибольшее распространение в задачах молекулярной динамики получила единственная в классе одностадийных симплектическая схема второго порядка Verlet.

Для построения схем порядка выше второго требуется увеличение числа стадий  $m$ , по крайней мере, до трех. Вывод условий порядка для

схем с большим числом стадий технически весьма сложен, методы их получения вполне конструктивны, но весьма громоздки и не приводят к явной форме для условий высокого порядка.

Разработан новый метод вывода условий произвольного порядка  $p$  для коэффициентов явных  $m$ -стадийных симплектических разностных схем RKN. Метод основан на разработанных нестандартных алгоритмах разложения в ряды точных решений уравнений молекулярной динамики (задачи о движении материальной точки в центральном силовом поле) и решений разностных уравнений схем RKN. В отличие от методов, описанных в литературе, новый метод приводит к явному компактному представлению условий порядка для любых значений параметров  $m$  и  $p$ .

Несмотря на идейную простоту нового метода, для его практической реализации требуется привлечение систем компьютерной алгебры (Maple, Mathematica).

В результате совместной работы сотрудников ИТМФ и Московского авиационного института в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. предложены два метода повышения эффективности расчета сверхзвуковых течений на произвольных неструктурированных сетках.

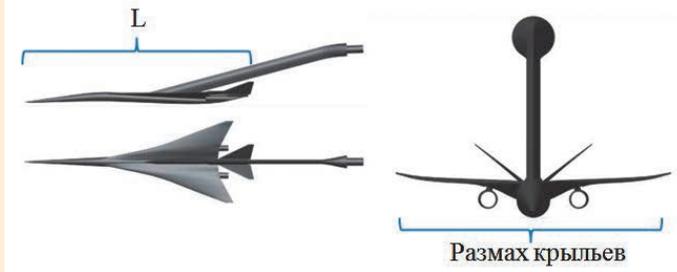
Первый метод способствует ускорению сходимости численного решения и основан на применении многосеточного геометрического метода для начальной инициализации поля течения. Метод применяется для получения начального поля распределения физических величин, максимально соответствующего сошедшему решению. Для этого на последовательности грубых

сеток выполняется расчет рассматриваемой задачи, начиная с самой грубой сетки в последовательности. По завершении расчета полученное решение интерполируется на более подробную сетку и используется как начальная инициализация для расчета на ней.

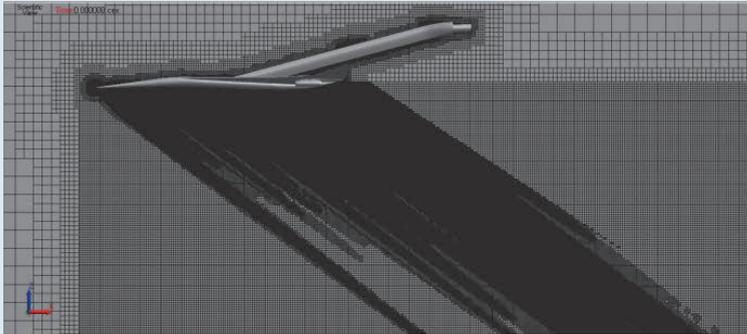
Второй метод способствует повышению точности численного решения и основан на применении статической адаптации расчетной сетки к особенностям течения. Алгоритм статической адаптации обеспечивает автоматическое измельчение расчетной сетки в области особенностей течения, например, ударных волн, характерных для сверхзвуковых течений. Такой алгоритм за счет локального измельчения сетки позволяет более качественно прописать фронт ударной волны (при этом выбор области локального измельчения выполняется автоматически).

Результаты применения предложенных методов были продемонстрированы на задачах сверхзвуковой аэродинамики: расчет интенсивности головной ударной волны на заданном расстоянии под осесимметричным телом Seeb-ALR и расчет сверхзвукового обтекания модели летательного аппарата Lockheed Martin 1021 (LM1021). В задачах рассматривается обтекание модели сверхзвукового летательного аппарата LM1021 потоком вязкого сжимаемого газа.

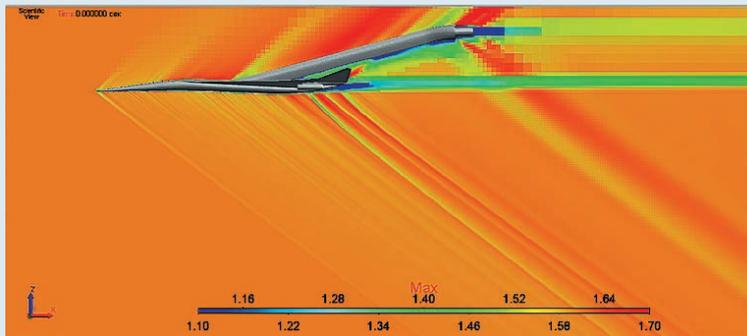
Для решения данной задачи применялся аэрогидродинамический модуль отечественного пакета программ ЛОГОС. Задача решалась на установление течения. Математическая модель решения основана на использовании связанного типа решателя, многосеточной инициализации, применении неявной разностной схемы, схемы расчета конвективных потоков AUSMPW, модели турбулентности Спаларта – Алмараса.



Геометрия исследуемого объекта

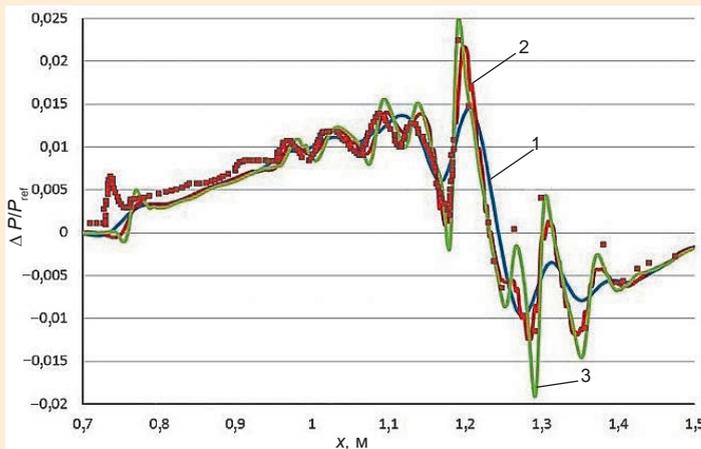


а



б

Расчетная сетка, второй уровень адаптации: а – расчетная сетка, б – поле распределения числа Маха



Нормированное изменение статического давления: ■ – эксперимент, 1 – базовая сетка, 2 – сетка 1-го уровня адаптации, 3 – сетка 2-го уровня адаптации

С использованием многосеточной инициализации решение сошлось за 355 итераций, в то время как в расчете без нее – за 500 итераций. Таким образом, ускорение от использования многосеточной инициализации с учетом затраченного на нее времени составило примерно 20 %.

Далее с использованием критерия по давлению было выполнено 2 уровня адаптации базовой сетки. Характерный размер ячеек в зонах адаптации составлял 0,0025 и 0,001 м для первого и второго уровня соответственно. Дальнейшее измельчение расчетной модели не привело к изменению решения, что говорит о достигнутой сеточной сходимости решения.

Из графика нормированного изменения статического давления видно, что расчет на базовой сетке не может описать точки экстремума давления в серии скачков в хвостовой части летательного аппарата (участок от 1,2 до 1,4 м). Причиной этого является недостаточная сеточная разрешимость в области фронта ударной волны: возмущение, идущее от обтекаемого объекта, диссипирует и теряет свою интенсивность на ячейках данного размера. После применения алгоритма адаптации в области ударной волны расчетная сетка стала мельче, что значительно приблизило полученные результаты к экспериментальным данным.

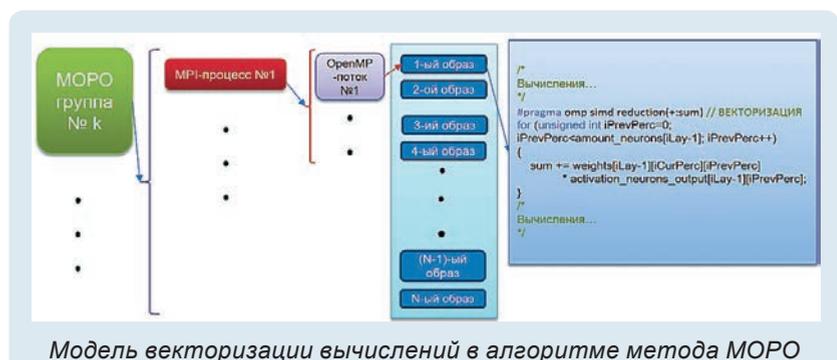
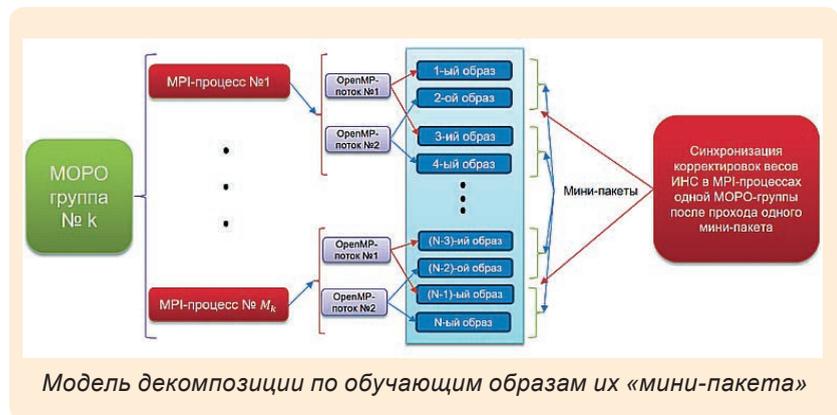
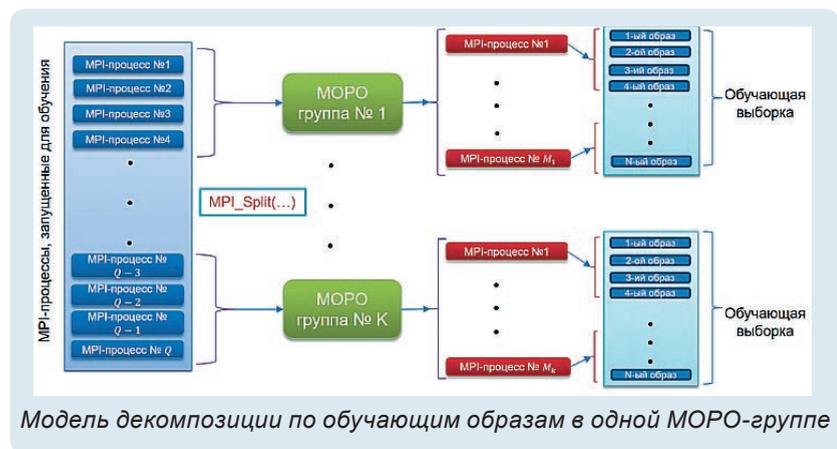
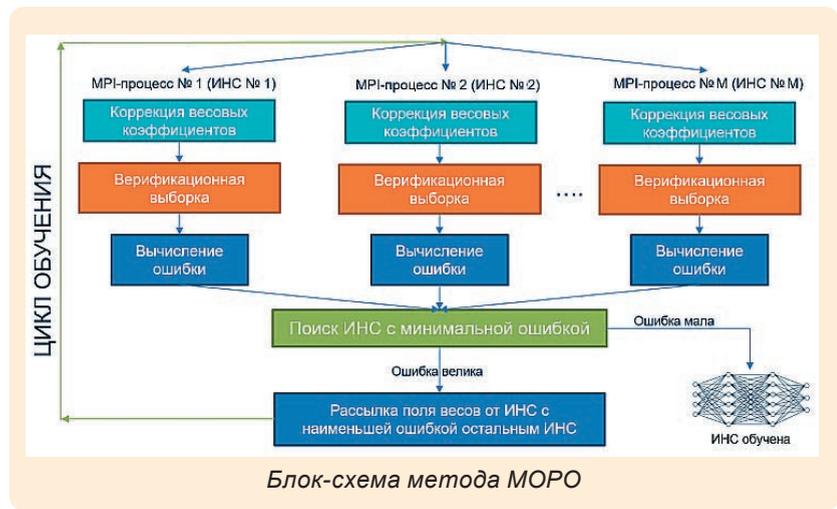
На примере представленной задачи показано, что в обоих случаях за счет применения многосеточного геометрического метода для начальной инициализации было достигнуто ускорение сходимости численного решения, а за счет построения локального измельчения в области фронта ударной волны (средствами статической адаптации) получено более качественное и точное решение.

В методике МИМОЗА в 2022 г. сотрудниками математического отделения для решения задач машинного обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) был разработан и внедрен новый алгоритм – многосетевой метод обратного распространения ошибки (МОРО), который является модификацией алгоритма обратного распространения ошибки (ОРО) и позволяет избежать проблем «зависания» алгоритма обучения в локальных минимумах и эмпирического подбора коэффициента скорости обучения (СО).

При машинном обучении по методу МОРО обучается множество ИНС с уникальным коэффициентом СО. Обучение ИНС выполняется посредством «мини-пакетного» режима метода ОРО. В процессе обучения выполняется синхронизация весовых коэффициентов в зависимости от значения функции стоимости каждой ИНС.

Для реализации этапа декомпозиции по обучающей выборке использовался программный интерфейс MPI. С помощью функции `MPI_Split` создается MPI-коммуникатор, или группа MPI-процессов, с экземплярами класса «нейронная сеть» с одинаковой СО в рамках MPI-коммуникатора – одна МОРО-группа. Каждому MPI-процессу из МОРО-группы устанавливается размер порции из обучающей выборки. Синхронизация величин коррекции весовых коэффициентов между MPI-процессами одной МОРО-группы происходит после прохода по «мини-пакету».

Обучающие образы из «мини-пакета» распределяются между OpenMP-потоками. Каждый поток складывает значения коррекции весовых коэффициентов в свою, выделенную под поток область памяти. После прохода по «мини-пакету» с использованием оператора `omp critical` выполняется сборка ве-



личин коррекции в общий для МОРО-группы массив.

Изучена возможность применения *векторизации вычислений*. Проведена работа по выравниванию данных с помощью специализированной функции. Векторизация вычислений выполнена с помощью директив стандарта OpenMP 4.0.

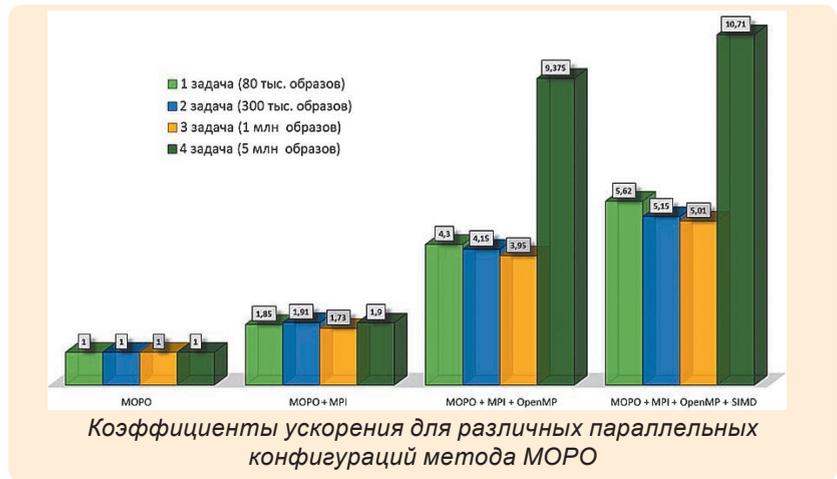
На диаграмме представлены коэффициенты ускорения для различных параллельных конфигураций метода МОРО для одной эпохи обучения. В процессе проведения тестов были выбраны следующие наиболее оптимальные конфигурации запуска:

- МОРО: 16 MPI;
- МОРО + MPI: 64 MPI (16 МОРО групп по 4 MPI-процесса в каждой группе);
- МОРО + MPI + OpenMP: 64 MPI (16 МОРО-групп по 4 MPI-процесса в каждой группе) и 2 OpenMP-потока (в «мини-пакете» 12 образов);
- МОРО + MPI + OpenMP + SIMD: 64 MPI (размер МОРО-группы – 4 MPI-процесса) и 2 OpenMP-потока (в «мини-пакете» 12 образов).

Видно, что использование модели распараллеливания МОРО + MPI + OpenMP + SIMD для задач с большими объемами обучающих образов позволяет сократить время выполнения одной эпохи обучения в 5–11 раз.

### ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. РАЗВИТИЕ ОСВАИВАЕМОЙ ПРОДУКТИВНОЙ ЛИНЕЙКИ

В 2022 г. в математическом отделении ИТМФ продолжалась работа по развитию возможностей отечественного прикладного программного обеспечения в части расширения классов прикладных задач, решаемых с использованием высокопро-



изводительных вычислений в интересах предприятий высокотехнологических отраслей промышленности и ОПК. В том числе развивались функциональные возможности различных тиражируемых цифровых модулей отечественного цифрового многомодульного продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС. Продолжалась работа по развитию осваиваемой продуктовой линейки ИТМФ.

В методике ТИМ, предназначенной для решения задач механики сплошной среды с использованием лагранжева подхода на неструктурированных многогранных сетках произвольного вида, в 2022 г. завершились работы, позволившие улучшить функциональные возможности проведения трехмерных расчетов в задачах с большими деформациями веществ в многообластной постановке.

Был разработан и введен новый функционал.

1) Введена поддержка смешанных ячеек для задач газодинамики с учетом упругопластичности и теплопроводности, а также поддержка моделей детонации взрывчатых веществ, моделей разрушения и компактирования материалов для смешанных ячеек.

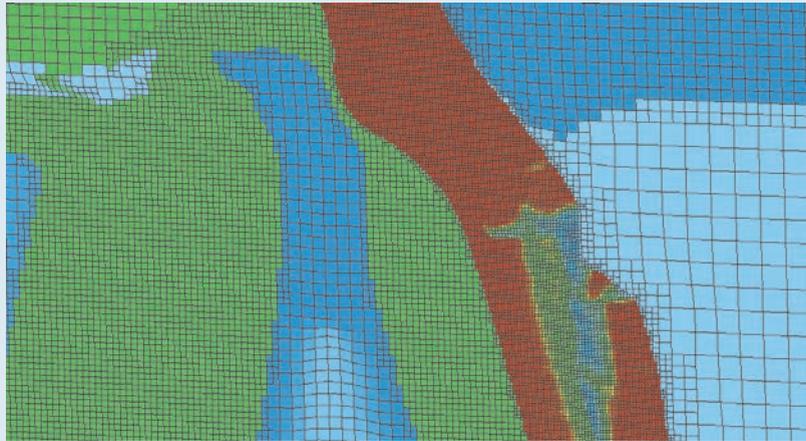
2) Разработаны алгоритмы автоматического поддержания качества подвижной сетки как локально, так и глобально

с адаптацией сетки под решение задачи без остановки расчета и вмешательства пользователя.

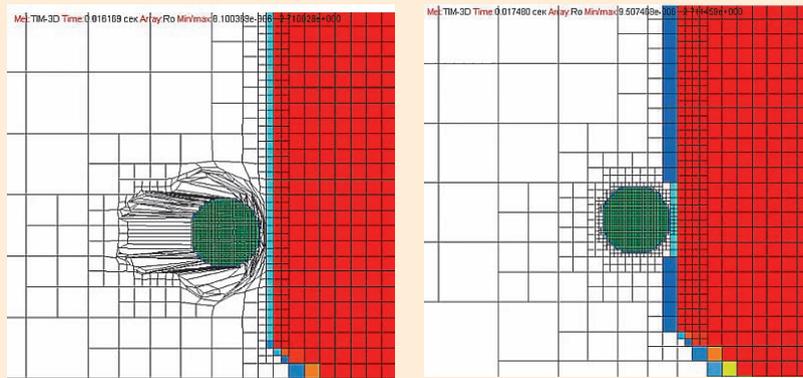
Алгоритм построения адаптированной под решение сетки содержит несколько основных этапов:

- прерывание счета задачи и подготовка данных для передачи в блок генерации сетки;
- формирование габаритов сетки и набора габаритов исходных ячеек;
- формирование дробно-адаптивного шаблона на основе данных от исходной сетки с учетом локальной детализации ячеек по веществам;
- конвертация шаблона в неструктурированный формат методики ТИМ. Неструктурированная сетка позволяет вводить различную детализацию сетки в локальных областях задачи, некратно увеличивая общее количество ячеек в задаче (по отношению к регулярным сеткам);
- интерполяция счетных данных со старой сетки на новую;
- продолжение счета задачи.

3) Введены новые методы распределенной декомпозиции данных по MPI-процессам, что позволило снять ограничения на количество используемых точек в задаче, тем самым существенно увеличив детализацию сетки.



Фрагмент задачи, в которой сетка адаптирована под решение по веществам



Сетка до и после перестроения в сечении OXY

Цикл сравнительных расчетов задач, имеющих аналитическое решение, и расчетов по одномерным, двумерным и трехмерным методикам показал работоспособность улучшенной методики ТИМ при проведении трехмерных расчетов задач с большими деформациями веществ.

В 2022 г. сделан значительный шаг в развитии тиражируемых цифровых программных модулей пакета программ ЛОГОС.

Так, появилась возможность использования модуля ЛОГОС-Аэро-Гидро для решения нового класса задач – моделирования процессов обледенения.

Группа сотрудников математического подразделения ИТМФ совместно с сотрудниками ФГУ ФНЦ «НИИ системных исследова-

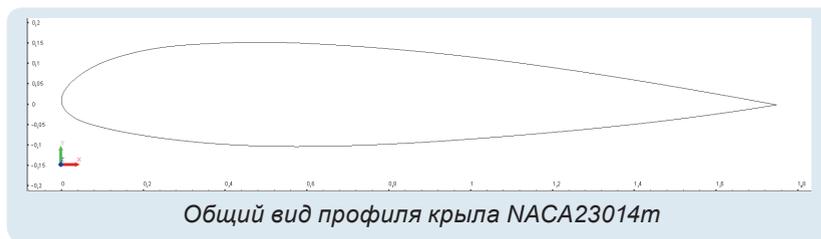
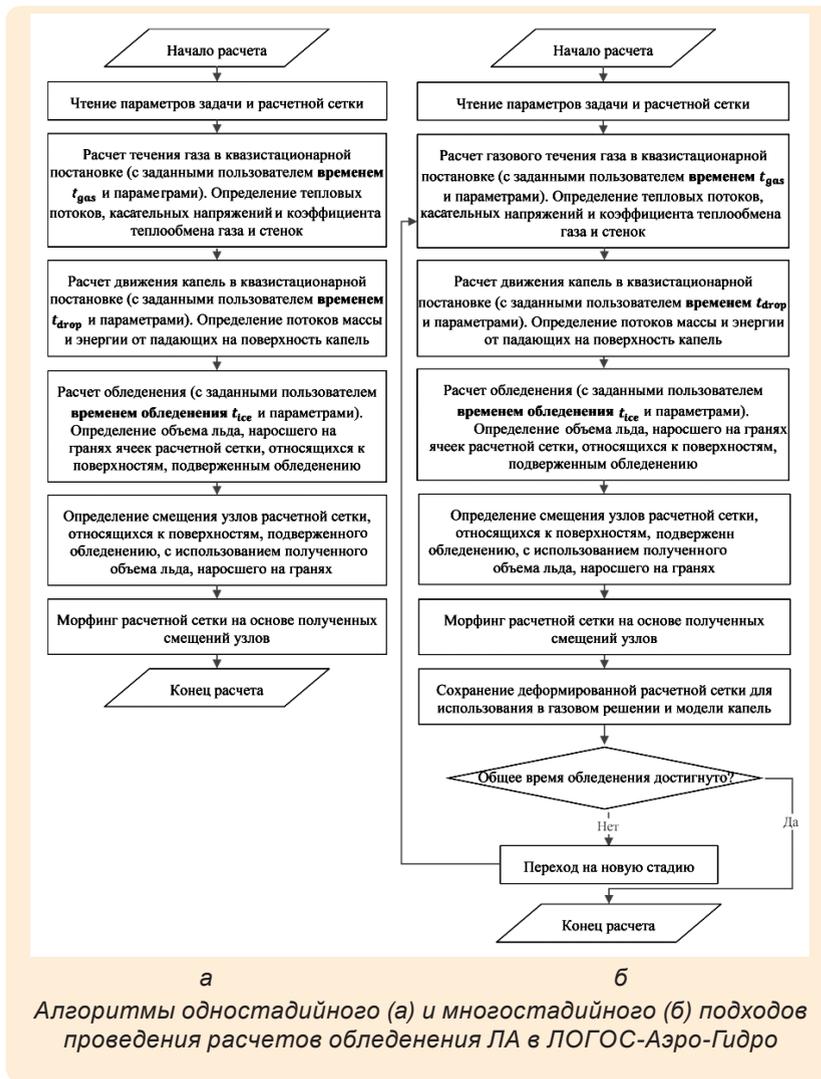
ний РАН» (Москва) предложили свой подход к решению задач обледенения летательных аппаратов (ЛА) и продемонстрировали его на примере решения некоторых задач с помощью модуля ЛОГОС-Аэро-Гидро.

Процесс моделирования обледенения в ПК ЛОГОС происходит в несколько этапов, на одном из которых проводится моделирование движения капли жидкости в расчетной области с использованием двух подходов на выбор пользователя: лагранжева и эйлерова.

При лагранжевом подходе капли жидкости представляют собой отдельные сущности, взаимодействующие между собой и с потоком газа. Предполагается, что под воздействием внешних сил капли могут испаряться и дробиться при

столкновении. Данный подход наиболее точен с точки зрения моделирования капель, но в инженерных расчетах на больших моделях он имеет высокую вычислительную нагрузку, так как необходимо описание процесса соударения частиц со всеми гранями поверхностной сетки ЛА.

В целях уменьшения расчетного времени используется эйлеров подход, в котором предполагается, что капли представляют собой сплошную среду, не влияющую на поток газа, не сталкиваются между собой и не испаряются. Эйлеров подход менее требователен к вычислительным ресурсам, однако имеет пониженную точность моделирования в связи с пренебрежением некоторыми физическими свойствами капель.



### Режимы моделирования задачи обледенения профиля крыла NASA23014m

№ эксп.	Хорда, м	$V$ , м/с	$T$ , К	$\alpha$ , °	LWC, кг/м <sup>3</sup>	MVD, м	Время, мин
219	1,745	87,2	251,3	0	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$160 \cdot 10^{-6}$	3
251	1,745	87,2	266,85	0	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$160 \cdot 10^{-6}$	21,2
123r8	1,745	88,5	267,85	5	$8 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-6}$	10

Примечание:  $V$  – скорость полета,  $T$  – температура набегающего потока,  $\alpha$  – угол атаки между скоростной и связанной системой координат, LWC – водность потока, MVD – средний диаметр капель, время – продолжительность процесса обледенения

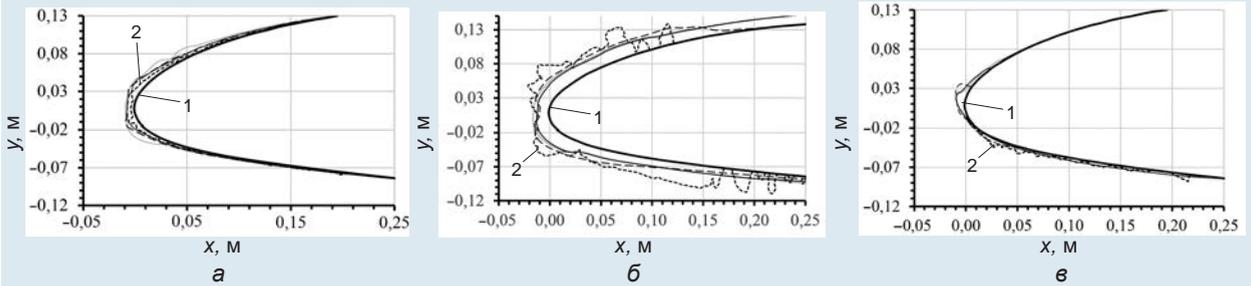
Последовательность этапов моделирования обледенения может быть выполнена с использованием двух подходов: одностадийного и многостадийного.

Основное отличие этих подходов заключается в учете влияния изменения формы ледяного нароста на аэродинамические характеристики ЛА и определении величины теплового потока на поверхности, подверженной обледенению. При одностадийном подходе расчет всех этапов проводится один раз. Достоинство данного подхода заключается в возможности проведения расчета на достаточно длительное время обледенения. Недостатки: при расчете не учитывается влияние формы ледяного нароста на аэродинамику ЛА и на расчет теплового потока от газа к поверхности модели; тепловой поток задается фиксированным для всего времени процесса обледенения; нельзя получить сложные формы ледяных наростов.

Многостадийный подход разбивается на несколько одностадийных этапов, являющихся шагами по времени, до достижения конечного времени. При этом тепловой поток на твердой поверхности и газовые параметры пересчитываются на каждом этапе. Поверхность модели изменяется после прохождения каждого этапа, что позволяет учесть эффект изменения формы крыла при образовании наледи и получать более сложные формы льда, приближенные к реальности.

**Задача 1:** моделирование обледенения двумерного профиля крыла NASA23014m. Результаты, полученные в ЛОГОС-Аэро-Гидро, сравниваются с результатами зарубежного программного обеспечения Lewis и экспериментом.

Расчетная сетка построена в препроцессоре ЛОГОС и содержит около 19 тыс. ячеек. Расчет обледенения профиля крыла проводился на режимах, представленных в таблице.



Формы наледи на передней кромке крыла *NACA23014t* для 1-го (а), 2-го (б) и 3-го (в) режимов обледенения: 1 – исходный профиль крыла, 2 – эксперимент, другие кривые – формы образовавшейся наледи при моделировании в ЛОГОС-Аэро-Гидро и *Lewis*

Все режимы решались с использованием многостадийного подхода из 5 этапов. Для моделирования капель жидкости использовались как эйлеров, так и лагранжев подходы.

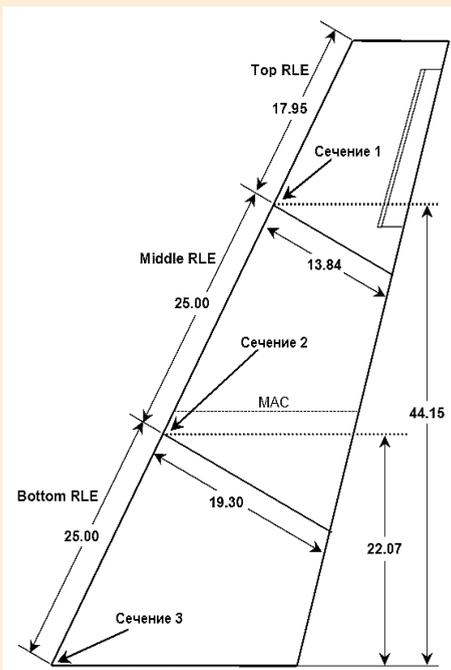
Результаты, полученные в ЛОГОС-Аэро-Гидро, вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и данными зарубежного ПО.

**Задача 2:** моделирование обледенения в крыла нормальной стреловидности *GLC-305*.

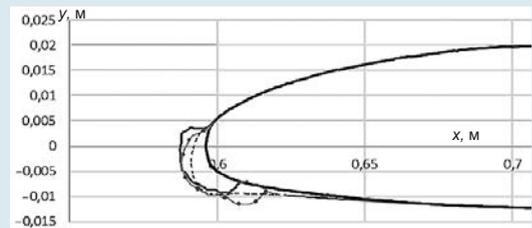
Расчет обледенения проводился при следующих парамет-

рах набегающего потока: число Маха  $M = 0,27735$ , давление  $P = 101325$  Па, угол атаки  $\alpha = 6^\circ$ ,  $LWC = 0,51$  г/м<sup>3</sup>,  $MVD = 14,5$  мкм, температура набегающего потока 261,87 К, температура торможения потока 266,9 К, время обледенения 5 минут. Задача решалась с использованием многостадийного подхода из 3 этапов. Для моделирования капель жидкости использовались эйлеров и лагранжев подходы. Оценка обледенения и сравнение с экспериментом проводились в трех сечениях крыла.

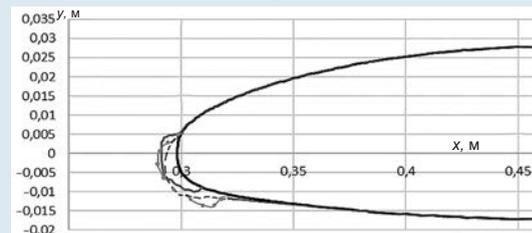
Как видно из рисунков, результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными, однако имеется некоторое отличие в форме нарощенного льда: в эксперименте основной нарост располагается на передней кромке, в расчетах полученный профиль более протяженный. Отличие объясняется тем, что для данной постановки задачи на передних кромках крыла необходимо более точно определять температуру стенки, которая задается на профиле фиксированным значением,



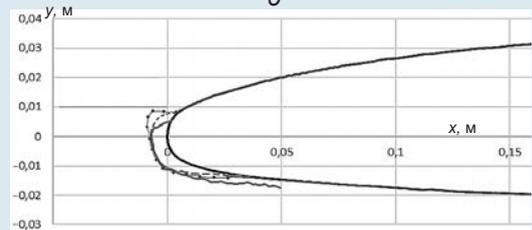
Общий вид крыла *GLC-305* с характерными размерами (в дюймах)



а



б

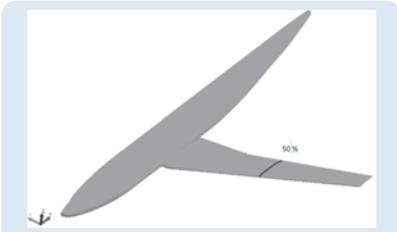


в

Форма льда в сечении 1 (а), 2 (б), 3 (в); — — исходный профиль крыла

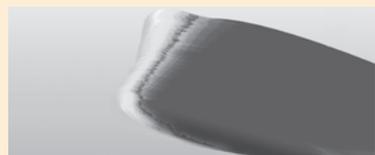
равным температуре торможения потока плюс 1 градус.

**Задача 3:** обледенение половины модели самолета DLR-F6.



Общий вид половины модели DLR-F6 с выделенным местом оценки результатов обледенения на середине крыла

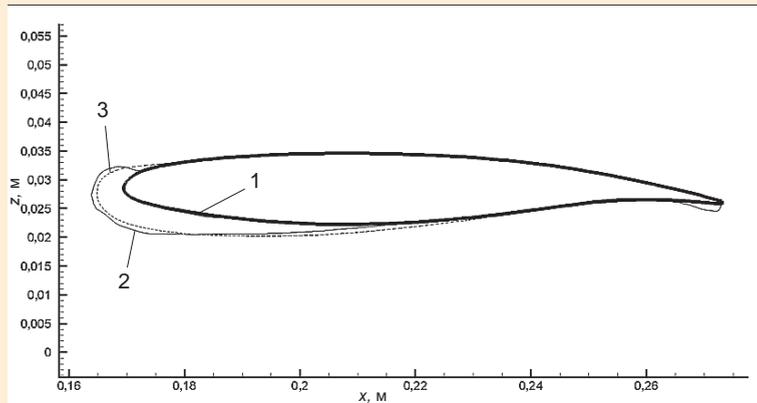
Расчет обледенения проводился при следующих параметрах набегающего потока: число Маха  $M = 0,235$ , давление  $P = 95060$  Па, угол атаки  $\alpha = 6^\circ$ ,  $LWC = 1$  г/м<sup>3</sup>,  $MVD = 20$  мкм, температура набегающего потока  $261,5$  К, время обледенения 3 минуты. Задача решалась с использованием одностадийного подхода. Для моделирования капель жидкости использовался эйлеров подход. Как видно из рисунка, результаты моделирования обледенения, полученные в ЛОГОС-Аэро-Гидро, достаточно хорошо согласуются с результатами зарубежного ПО (FENSAP-ICE).



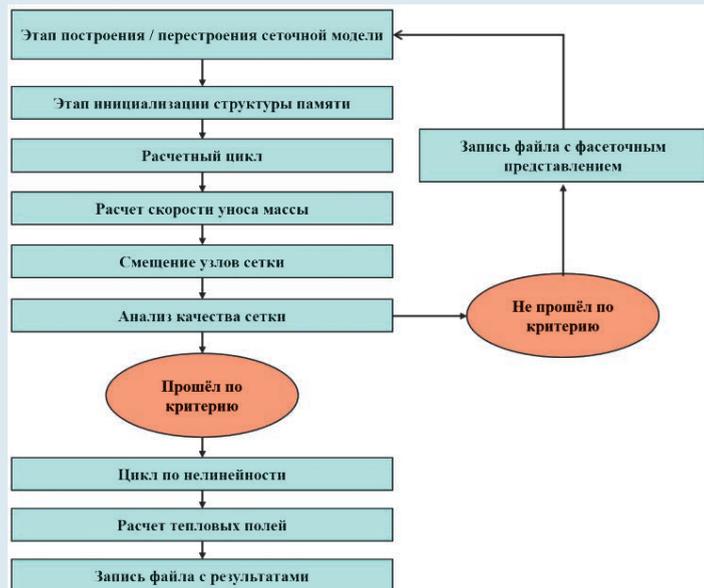
Визуализация обледенения модели DLR-F6, вид вдоль крыла

Таким образом, расчеты показали, что в ЛОГОС-Аэро-Гидро успешно реализована доступная пользователям возможность расчета задач обледенения с определением формы ледяного нароста на различных ЛА.

В настоящее время все большую актуальность приоб-



Форма льда в сечении середины крыла: 1 – исходный профиль крыла, 2 – ЛОГОС-Аэро-Гидро, 3 – FENSAP-ICE



Поэтапная схема расчета

ретаает задача проектирования и разработки гиперзвуковых летательных аппаратов. При этом в конструкциях необходимо учитывать воздействие интенсивных тепловых нагрузок со стороны набегающих высокоскоростных и/или высокотемпературных газовых потоков. К числу наиболее распространенных на практике инструментов предохранения элементов конструкции относится абляционная тепловая защита.

Для полноценного исследования влияния процесса абляции при проектировании летательных аппаратов огромную роль отводят теоретиче-

ским решениям, но поскольку большинство аналитических решений одномерные, они не позволяют в полной мере оценить закономерности протекания этих процессов в реальной трехмерной постановке.

В модуле ЛОГОС-Тепло, основанном на конечно-объемной аппроксимации закона сохранения энергии, реализован подход для моделирования трехмерных задач теплопроводности с учетом уноса вещества с поверхности твердого тела.

На примере решения задач теплопроводности с учетом формоизменения конструкции

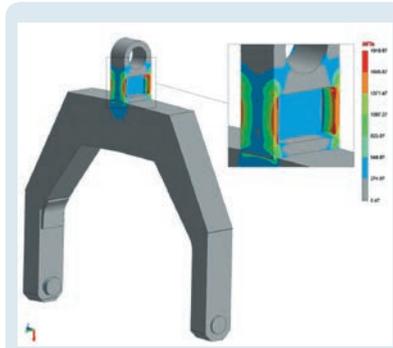
рассмотрен поэтапный алгоритм решения, включающий перестроение сеточной модели по достижении критерия останковки и продолжение расчета.

Верификация результатов применения в тестовых расчетах реализованного подхода для моделирования трехмерных задач теплопроводности с учетом уноса вещества с поверхности твердого тела проводилась на задачах, имеющих аналитические и экспериментальные данные. Максимальная относительная погрешность в решении составила менее 0,7 %, что говорит о применимости реализованного в модуле ЛОГОС-Тепло функционала к проведению производственных расчетов.

В модуле ЛОГОС-Прочность в 2022 г. был разработан программный блок, отвечающий за проведение анализа конструкций методом, при котором нагрузки задаются в виде, действующего в основании конструкции, а в результате получается распределение полей максимальных значений отклика конструкции. Допускаются как одноточечные, так и многоточечные виды нагружения конструкций, а также задание демпфирования конструкции в форме Рэлея. Был реализован набор методов для комбинирования отклика.

Другим направлением развития в модуле ЛОГОС-Прочность стало решение задач большого размера (до 30 млн уравнений). Для этого был реализован модуль сопряжения модуля ЛОГОС-Прочность и свободно распространяемой библиотеки MUMPS для решения линейных систем уравнений, работающий в параллельном MPI-режиме.

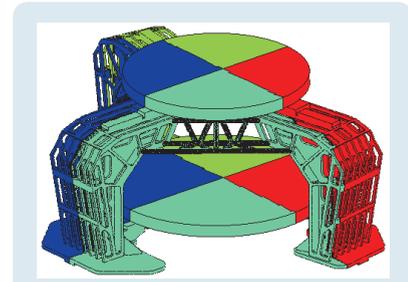
В 2022 г. продолжалась работа по развитию тиражируемого цифрового модуля ЛОГОС-Гидрогеология. Акцент



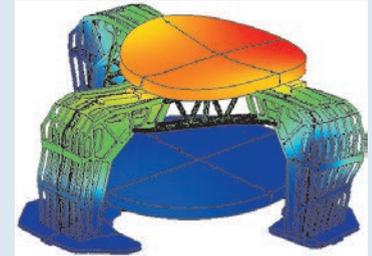
*Интенсивность напряжений в конструкции при действии нагрузок, соответствующих проектному землетрясению*

был сделан на продвижении модуля на рынок. Заключение несколько лицензионных договоров с предприятиями, проведено 8 семинаров с различными предприятиями в формате видеоконференции с информационными сообщениями, мастер-классами и обсуждением вопросов внедрения.

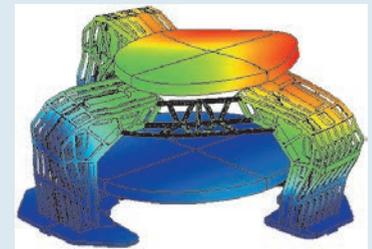
По итогам работ 2022 г. подготовлено техническое задание по расширению функционала цифрового продукта ЛОГОС-Гидрогеология в интересах решения задач горнодобывающих отраслей промышленности и частных и государственных недропользователей, региональных операторов ТКО и предприятий Госкорпорации «Росатом». Составлен учебный план по курсу «ЛОГОС-Гидрогеология» и подготовлены учебные материалы для практических занятий студентов. Проведены курсы обучения цифровому продукту ЛОГОС-Гидрогеология для студентов следующих вузов: Казанского федерального университета, филиала МГУ им. Ломоносова, Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского. Сделано 5 докладов на XVIII Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование».



*а*



*б*



*в*

*Декомпозиция расчетной модели (12 млн уравнений) между четырьмя процессорами в MPI режиме (а) и первая (б) и вторая (в) собственные формы колебаний рассматриваемой конструкции*

Продолжалось развитие функционала цифрового продукта ЛОГОС-Гидрогеология. Так, в блоке учета цепочек радиоактивного распада реализован аналитический метод расчета распада с помощью матричной экспоненты. В блоке автокалибровки реализован метод DDS (Dynamically Dimensioned Search). Проведена оптимизация работы алгоритма сеточного генератора, получено ускорение в 2,5 раза. Также в сеточном генераторе реализована возможность послойного построения двойственных сеток в параллельном режиме и построения сглаженной сетки вдоль оси OZ для повышения точности решения.

В рамках работ по аттестации программы НИМФА 6.0 проведена работа с экспертами и доработан верификационный отчет, верификационная база расширена на 6 задач в части учета цепочек радиоактивного распада.

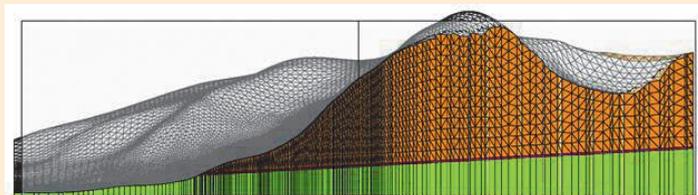
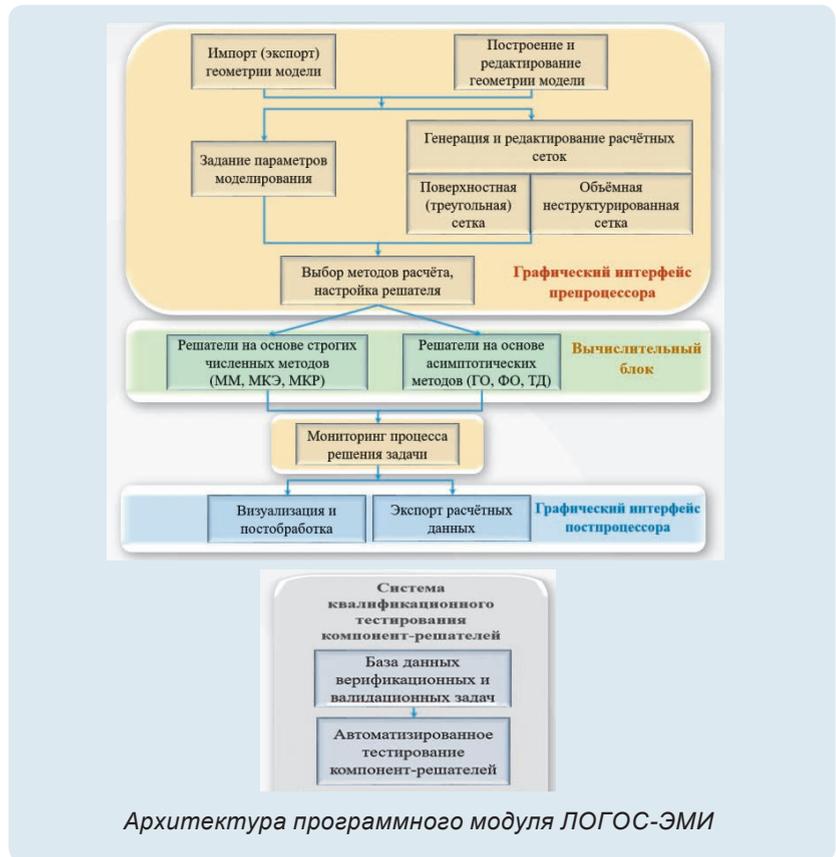
В 2022 г. в ходе работ по расширению функциональных возможностей цифрового продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС дальнейшее развитие получила версия создаваемого тиражируемого цифрового программного модуля ЛОГОС-ЭМИ для численного моделирования электромагнитных процессов на основе интегральных и дифференциальных форм уравнений Максвелла, включая универсальный интерфейс и эффективные решатели систем линейных алгебраических уравнений.

Для модуля ЛОГОС-ЭМИ были реализованы следующие методы расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) сложных технических изделий:

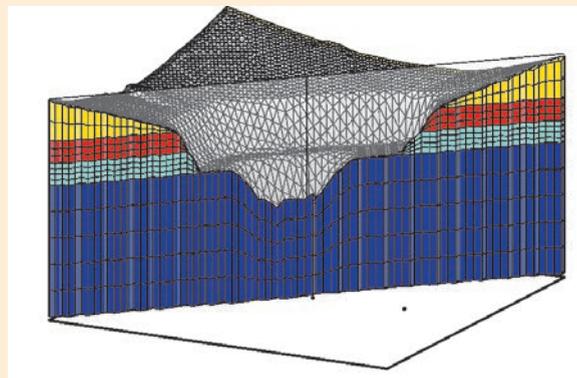
1) *метод моментов*, основанный на решении интегральных уравнений Максвелла для электрического и магнитного полей с использованием многоуровневых, мультипольных приближений для ускорения вычислений в заполненных, плохо обусловленных матрицах систем линейных алгебраических уравнений;

2) *метод конечных элементов* в частотной области, основанный на решении дифференциальных уравнений Максвелла, принимающих форму векторных уравнений Гельмгольца. Метод особо эффективен для расчетов объектов произвольной формы в неоднородных средах;

3) *метод физической теории дифракции* для нахождения рассеянного поля в дальней зоне от тел с большими электрическими размерами.



а



б

*Разрез модели горной выработки закрытого (а) и открытого (б) типов*

Программные средства, реализующие перечисленные методы, были интегрированы в вычислительный блок программного модуля

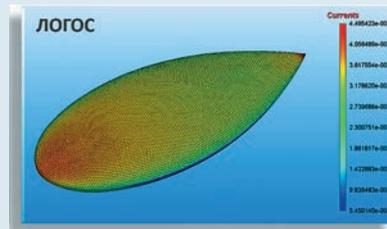
ЛОГОС-ЭМИ и использовались для расчета задач по определению ЭПР различных объектов из верификационного базиса.

Проведено тестирование разработанных программных средств с использованием метода моментов, метода конечных элементов и метода физической теории дифракции на простейших моделях (миндалевидное тело, сфера, цилиндр). Получено удовлетворительное согласие с данными расчетов, взятыми из литературных источников.

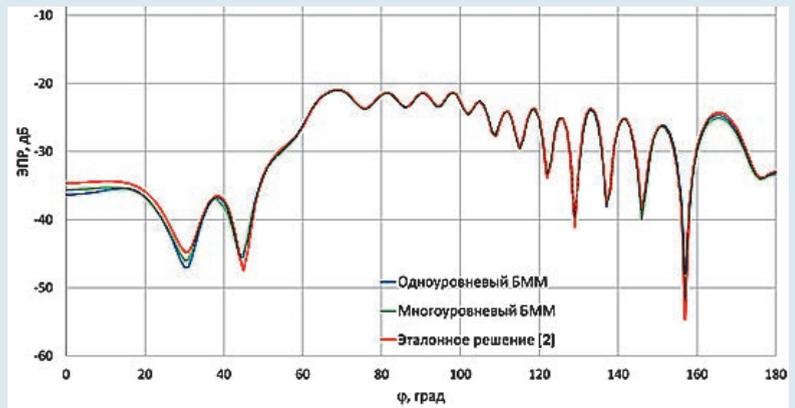
Разработан метод построения многогранных сеток, состоящих из ячеек произвольной формы, не имеющих ограничений по количеству узлов и граней. Предложенный метод был реализован в форме автоматического генератора неструктурированных объемных сеток из произвольных многогранников для трехмерного моделирования течений жидкости и газа в рамках препроцессора цифрового продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС и хорошо зарекомендовал себя на практике.

Ячейки формируются на основе первичной сетки из тетраэдров и треугольных призм по гибридной схеме: преимущественно это *centroid dual*, а вблизи поверхности в областях с геометрическими особенностями – *median dual*.

По схеме *median dual* узлами вторичной сетки (вершинами двойственных многогранных ячеек) являются центроиды тетраэдральных ячеек, центроиды треугольных граней, середины ребер первичной сетки. Двойственная ячейка строится таким образом, что центроиды ячеек сетки с общим узлом соединены друг с другом через середины разделяющих их граней. По схеме *centroid dual* узлы вторичной сетки – центроиды тетраэдров, а также центроиды граней и середины ребер на поверхности первичной сетки.

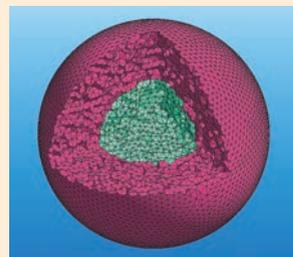


а



б

Расчет методом моментов рассеяния плоской электромагнитной волны на идеально проводящем теле миндалевидной формы: а – распределение наведенного тока на поверхности тела; б – сравнение результатов расчета ЭПР быстрыми методами мультиполей с эталонным решением

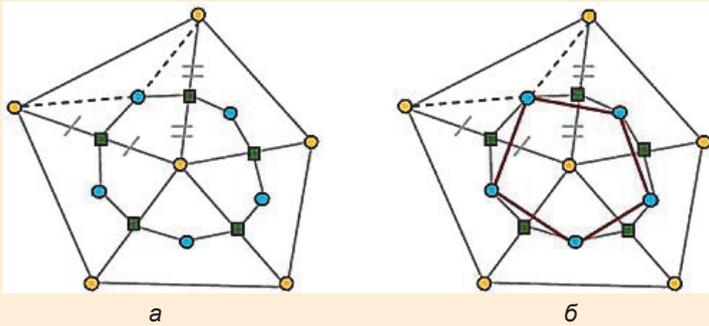


а



б

Расчет методом конечных элементов рассеяния плоской электромагнитной волны на диэлектрической сфере: а – геометрия задачи; б – сравнение аналитического и численного значений ЭПР для расчетов с использованием конечных элементов 1-го и 2-го порядков



Построение двойственной ячейки: а – по схеме median dual; б – по схеме centroid dual

Начальными данными для построения объемной сетки  $G_{dual}$  из произвольных многогранников являются: точность модели (минимально допустимый размер ребра аппроксимации); характерные кривые  $C^u$ , заданные пользователем; пороговый угол между треугольниками и пороговый дефицит угла  $d = 2\pi - \sum \alpha_i$ , где  $\alpha_i$  – угол между соседними ребрами треугольников, сходящихся в данном узле в узлах сетки  $B$  для автоматического определения характерных кривых  $C^A$ ,

определяемых автоматически в генераторе; толщина пограничного слоя для каждой границы; количество призматических слоев вблизи поверхности тела; коэффициент сгущения призматических слоев; максимальный размер ребра тетраэдра первичной сетки  $G_{prim}$ ; тип и положение контрольной области  $H \subset \Omega^T$  (параллелепипед, конус, цилиндр, сфера, тонкостенный вариант данных тел, многогранник и ограниченное треугольной аппроксимацией произвольное геометрическое

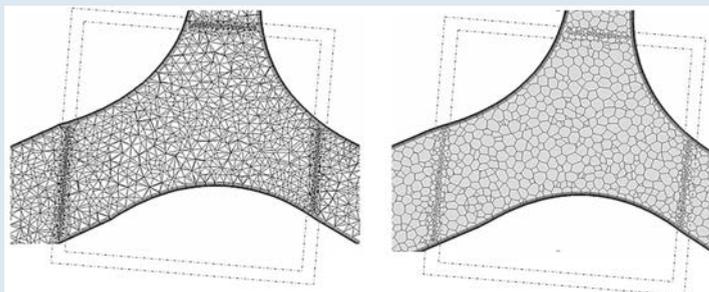
тело); локальный размер ребра на поверхности и внутри контрольной области.

Процесс генерации объемной неструктурированной многогранной сетки состоит из следующих этапов:

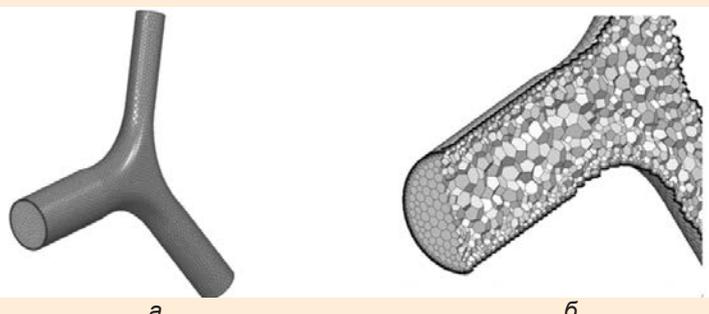
- построение первичной сетки  $G_{prim}$ ;
  - определение множества  $S$  характерных кривых – ломаных линий, проходящих по ребрам поверхностной сетки и описывающих особенности геометрической модели: линии стыковки границ, острые кромки и детали геометрии;
  - построение треугольной поверхностной сетки, смещенной относительно исходной сетки  $B$ ;
  - построение призматической сетки;
  - построение тетраэдральной сетки;
  - формирование границ первичной объемной сетки;
  - построение вторичной сетки  $G_{dual}$ ;
    - классификация узлов первичной сетки;
    - вычисление координат узлов вторичной сетки;
    - формирование ячеек вторичной сетки;
    - формирование границ многогранной сетки.

Продолжалось развитие комплекса программ «Пакет УРС-ОФ» (Уравнений Состояния Общего Фонда). Комплекс предназначен для расчета теплофизических свойств веществ при решении задач математического моделирования процессов, реализующихся в различных конструкциях при их динамическом нагружении.

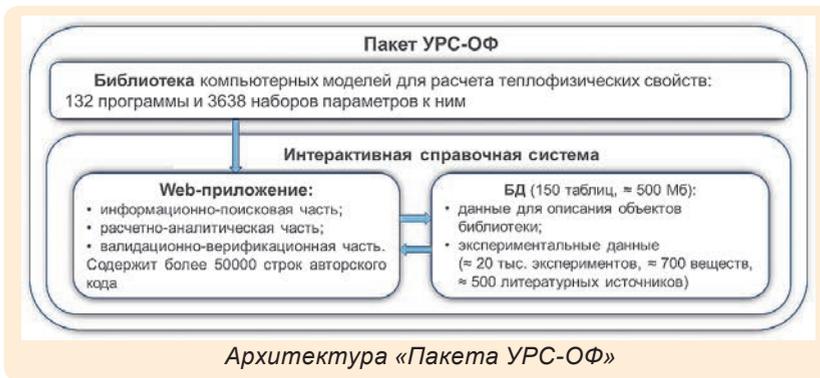
На текущий момент «Пакет УРС-ОФ» состоит из двух взаимосвязанных частей – библиотеки компьютерных моделей теплофизических свойств с унифицированными интерфейсами вызовов на различных архитектурах вычислите-



Сечение объемных сеток с локальным измельчением: а – первичная сетка, б – вторичная сетка



Вид объемной сетки: а – на поверхности, б – на поверхности группы ячеек относительно плоскости симметрии



лей и интерактивной справочной системы (ИСС).

В состав библиотеки УРС-ОФ входят программы, реализующие вычисление термодинамических функций по уравнениям состояния средних, спектральных и многогрупповых пробегов фотонов; средних степеней ионизации; упругопластических свойств; электропроводности; электронной и ионной теплопроводности. Все программы расчета теплофизических свойств дополнены наборами параметров, характеризующих свойства конкретного вещества. Параметры веществ хранятся в виде архива файлов.

Информационное сопровождение библиотеки УРС-ОФ обеспечивает интерактивная справочная система: она предоставляет возможность обоснованного выбора из библиотеки различных наборов компьютерных моделей для использования в методиках ИТМФ.

ИСС – специализированная информационная система, созданная в виде сайта с помощью технологии *клиент – сервер*. Программные модули веб-приложения взаимодействуют с базой данных, где собраны информация с описанием объектов библиотеки и экспериментальные данные.

Главная страница сайта содержит меню навигации и информационный блок для работы с библиотекой УРС-ОФ: руководство пользователя, описание изменений библиотеки

по версиям, описание ошибок и информационных сообщений, которые могут возникнуть при работе с библиотекой. ИСС имеет интуитивно понятный интерфейс, который включает в себя информационно-поисковую, расчетно-аналитическую

и валидационно-верификационную части.

Информационно-поисковая часть обеспечивает возможность поиска и получения информации о моделях, реализованных в программных модулях библиотеки УРС-ОФ, наборах параметров к ним.

Для описания моделей и наборов параметров конкретных веществ разработаны специальные документы – паспорта моделей. Они содержат общую информацию (номер, название, автор и т. д.), описание модели и область ее применения, порядок задания сменных параметров, краткое описание программы расчета, список рассчитываемых функций, лите-

Уравнения состояния			
<b>ПАСПОРТ</b>			
Название модели	Уравнение состояния типа ОСА		
Номер набора констант	122814 (прозрачный)		
Вещество	Алюминий		
Альтернативное название	УРС ОСА		
Химический символ/Состав	Al		
Нормальная плотность	2,71 г/см <sup>3</sup>		
Дата создания	1993 г.		
Дата поступления в библиотеку	1993 г.		
Дата последней модификации	2004 г.		
Автор(ы)	Глуша Б. Л., Гударенко Л. Ф., Маначин С. Ф., Стажин Ю. М.		
Паспорт состав(ов)	Гударенко Л. Ф., Голубкова Е. Ф.		
Расчет в точке. Визуализация	Расчет в точке, расчет изополей, расчет ударных адиабат		
Экспериментальные данные	База данных ЭДИСС		
<b>Комментарий.</b>			
Имеется устаревшая версия U13F014, где при $\delta \rightarrow 0$ , $\gamma_p \rightarrow \infty$ . В 2004 году введены алгоритмы расчета энтропии.			
<b>Рекомендуемая область применимости.</b>			
$10^{15} \text{ К} \leftarrow T \leftarrow 35000 \text{ К}$ , $0,6 \rho_0 \leftarrow \rho \leftarrow 5 \rho_0$			
<b>Примечание.</b>			
1. Описание уравнения состояния и констант приведено в [1, 2], описание констант с измененной функцией $\gamma_p$ (при $\delta \neq 0$ ) приведено в [3].			
2. Стандартные значения энтропии взяты из справочника [4]. Имеется устаревшая версия U13F014, где $\gamma_p \rightarrow \infty$ при $\delta \rightarrow 0$ .			
<b>Оценка времени счета уравнения состояния. (ссылка на документ)</b>			
Приняты следующие обозначения:			
$t_{\text{оп}}^{\text{УРС}} \sim 111$ – отчисленная оценка для области применимости УРС;			
$\Delta$ – диапазон значений $t_{\text{оп}}$ по областям, причём если разница между верхней и нижней границей диапазона меньше 5%, то $\Delta$ представлено одним числом.			
$t_{\text{оп}}$	$\rho$ -T	$\rho$ -E	$\rho$ -P
2,7	2,5-2,8	2,6	2,6-2,8
		2,9	2,7-2,9

а

Таблица - Параметры уравнения состояния и порядок их задания				
Номер	Обозначение	Название	Значение	Размерность
1	CE	Номер системы единиц	3	1
2	$\rho_0$	Нормальная плотность вещества	2,71	г/см <sup>3</sup>
3	$P_{\text{кр}}$	Критическое давление (откопанная прочность)*	-1E+18	ГПа
4	$T_0$	Значения температуры, давления, энергии в точке нормироваи	293	К
5	$P_0$		0,0001	ГПа
6	$E_0$		0	МДж/г
7	$\rho_{\text{нр}}$	Плотность нормироваи $\rho_{\text{нр}}^0(0)$ и $\gamma_p$	2,71	г/см <sup>3</sup>
8	$\delta_1$	Значение относительного сжатия на границе 1-го и 2-го участков зависимости $P_{\text{нр}}(\delta)$	1	1
9	$a_1$	Коэффициенты и показатели степени зависимости $P_{\text{нр}}(\delta)$ на первом участке	14,716436	ГПа
10	$b_1$		-14,716436	ГПа
11	$\delta_1$		5,2373284	1
12	$m_1$		0	1
13	$\delta_2$	Значение относительного сжатия на границе 2-го и 3-го участков зависимости $P_{\text{нр}}(\delta)$	1,3497322	1
14	$a_2$	Коэффициенты и показатели степени зависимости $P_{\text{нр}}(\delta)$ на втором участке	-18962,763	ГПа
15	$b_2$		18962,763	ГПа
16	$\delta_2$		2,1451101	1
17	$m_2$		2,1491746	1

Внимание! Общее количество констант равно 50.

Примечание.

\*Если давление  $P$ , рассчитанное по УРС меньше  $P_{\text{кр}}$ , то принимается  $P=0$ .

б

Фрагмент паспорта вещества (набора параметров): общая информация о наборе параметров уравнения состояния (а) и таблица параметров УРС и порядок их задания (б)

ратурные источники. Паспорта веществ (наборов параметров) формируются программно с помощью сведений из базы данных пакета УРС-ОФ и файлов с числовыми значениями параметров, содержащих общую информацию о веществе, таблицу со значениями и размерностями параметров, результаты сравнений с экспериментальными данными и расчетами по другим моделям, литературные источники и т. д.

Расчетно-аналитическая часть обеспечивает проведение расчетов термодинамических функций по компьютерным моделям в точке и на изолиниях (ударных адиабатах, изоэнтропах, изотермах, изохорах, изобарах, границах *твердое тело – жидкость*). Разработан шаблон поэтапного задания начальных данных. Результаты расчетов представляются в виде таблиц, реализован экспорт данных. При визуализации есть возможность одновременного построения несколько изолиний, рассчитанных по одной или нескольким моделям, задания различных типов графиков, их изменения масштаба, сравнения расчетов с экспериментальными данными.

Валидационно-верификационная часть обеспечивает поиск, просмотр, визуализацию и экспорт данных о свойствах веществ, полученных в экспериментах с ударными волнами. Экспериментальные данные ИСС используются при разработке новых уравнений состояния и для оценки точности уже имеющихся в пакете УРС-ОФ.

Реализована возможность поиска веществ по названию, составу и типу экспериментальных данных. Разработан шаблон представления экспериментальных данных, содержащий таблицы с упорядоченной информацией и графической интерпретацией.

**Расчет изотроп по уравнениям состояния**

1 Модель уравнения состояния  
У98 УРС РОСА-ИИ с нормировкой на нормальные условия, с возможностью расчета в трехтемпературном приближении

2 Набор констант  
U98F014   
Коэффициент констант

3 Система единиц  
3   
p[г/см<sup>3</sup>] T[К] E[кДж/г] P[ГПа]

4 Тип расчета  
проходит через точку на ударной адиабате  
Параметры ударной адиабаты  
P<sub>00</sub> 2,71 г/см<sup>3</sup> (0<P<P<sub>00</sub>)  
E<sub>0</sub> 0 кДж/г  
P<sub>0</sub> 0 ГПа  
P 500,2 ГПа   
Экспериментальные точки изотроп на УА из БД ЭДИСС (CE-3) для P<sub>00</sub> = 2,71 г/см<sup>3</sup>  

P <sub>00</sub> , г/см <sup>3</sup>	P, ГПа	U, км/с
2,703	241,6	6,44
2,703	305,7	7,47
2,703	492,7	10
2,703	500,2	10,09

  
плотность 5,990051E+000 г/см<sup>3</sup>  
энергия 5,05326E+001 кДж/г  
давление 5,002000E+002 ГПа  
массовая скорость 10,0533834895536 км/с  
скорость звука 1,432309E+001 км/с

5 Алгоритм вычисления  
Плотность - Давление  
Интеграл по давлению  
начальное давление 500 ГПа  
конечное давление 50 ГПа  
сетка Логарифмическая  
число точек 11 (от 3 до 101)

6 Значения TF, EPSA, EPSO  
По умолчанию

7    
 Плотность  
 Полное давление  
 Холодная составляющая давления  
 Полная энергия  
 Холодная составляющая энергии  
 Температура  
 Массовая скорость вещества  
 Изэнтропическая скорость звука

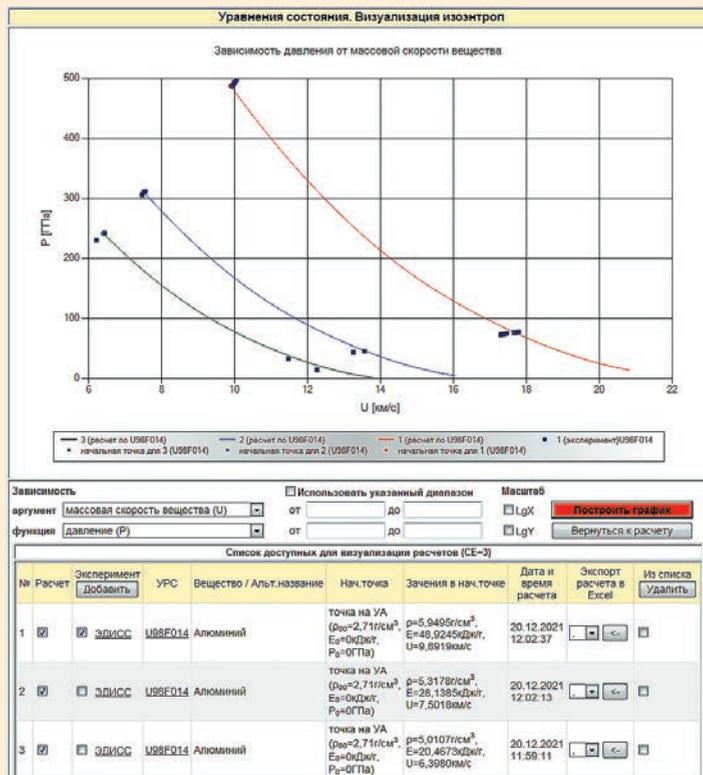
8  Расчет произведен. Результаты приведены ниже.

Визуализация результатов расчета  Разделитель .

Точка на ударной адиабате							
№	p	P	E	T	U	CS	KO
1	5,9901	5,0020E+02	5,0532E+01	2,9855E+04	1,0055E+01	1,4323E+01	0

Результат расчета по U98F014							
№	p	P	E	T	U	CS	KO
1	5,9892	5,0000E+02	5,0519E+01	2,9849E+04	1,0056E+01	1,4321E+01	0
2	5,5025	3,9716E+02	4,2020E+01	2,8549E+04	1,1230E+01	1,3491E+01	0
3	5,0674	3,1546E+02	3,5084E+01	2,3759E+04	1,2306E+01	1,2852E+01	0
4	4,6828	2,5059E+02	2,9489E+01	2,1386E+04	1,3265E+01	1,2179E+01	0

a



b

Интерфейс расчета (a) и визуализации изотроп по уравнениям состояния (b)



брать априори оптимальные режимы работы оборудования, исследовать процессы, происходящие в ванне расплава при формировании отдельных треков, рассчитать зеренную и первичную микроструктуру полученного материала.

С помощью программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер» созданы различные детали, проведены серии разнообразных расчетов изготовления деталей и расчетов оптимальных режимов работы оборудования, выполнена предпечатная подготовка, успешно напечатаны более 100 деталей. Печать деталей выполнялась в отделении 07 РФЯЦ-ВНИИЭФ на принтере MeltMaster 250 производства ОАО «НПО ЦНИИТмаш».

Процесс подготовки деталей к печати в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» состоит из последовательности нескольких операций. Каждая операция в программе задается в своем пользовательском диалоге. Последовательность операций, которую необходимо выполнить пользователю:

- компоновка деталей на платформе и задание настроек;
- генерация поддержек;
- нарезание деталей на слои (слайсинг);
- заполнение слоев штриховкой (хэтчинг);
- генерация управляющего кода.

В направлении развития продуктовой линейки в математическом отделении ведутся работы по разработке и сертификации защищенной операционной системы «Арамид» (ЗОС «Арамид») под разные архитектуры супер-ЭВМ. ЗОС «Арамид» является единственным в России дистрибутивом защищенной операционной системы (ОС) типа А (ОС общего назначения) 2-го класса защи-



Примеры распечатанных платформ

ты (по классификации ФСТЭК России).

Дистрибутив ОС «Арамид» предназначен для организации параллельных высокопроизводительных вычислений на супер-ЭВМ различной производительности, в которых допускается обработка информации ограниченного доступа, в том числе содержащей сведения, составляющие государственную тайну с уровнем секретности до «совершенно секретно». Данный дистрибутив применяется на высоконагруженных параллельных супер-ЭВМ для оперативного решения задач организаций Госкорпорации «Росатом», Минобороны России, ОПК (авиастроение, судостроение, ракетно-космическая отрасль и др.).

В 2022 г. обновлена кодовая база дистрибутива и устранены актуальные уязвимости; выполнена доработка механизма контроля отчуждаемых устройств хранения; реализован ряд доработок в системе мониторинга MonDiag и графической интерактивной веб-среде CLDE; осуществлен переход на новую версию коммуникационного пакета UCX. Обновление дистрибутива ОС «Арамид» передано в испытательную лабораторию для инспекционного контроля

в связи с внесением изменений в сертифицированную ОС.

Обновленная версия дистрибутива ОС «Арамид» установлена на вычислительных системах РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, АО «ЦСМ», ОАО «РТИ».

В ходе работ 2022 г. по развитию продуктовой линейки на базе размещенного в Технопарке дочернего предприятия ЦКО (Центр компетенций и обучения) продолжалось мелкосерийное производство программно-аппаратных комплексов терафлопсного класса на основе компактных супер-ЭВМ. По заказам таких сторонних организаций, как АО «Корпорация МИТ» (Москва), ФЭИ (г. Обнинск), СарфТИ НИЯУ «МИФИ» (г. Саров), в 2022 г. были собраны и сданы заказчикам вычислительные системы с суммарной пиковой производительностью 49,8 Тфлопс и стоимостью 20,165 млн рублей. От продажи внешним пользователям, имеющим удаленный доступ к супер-ЭВМ, размещенной в ЦКО, выделяемого времени для производственных расчетов заказчиков получено 9 млн рублей.

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

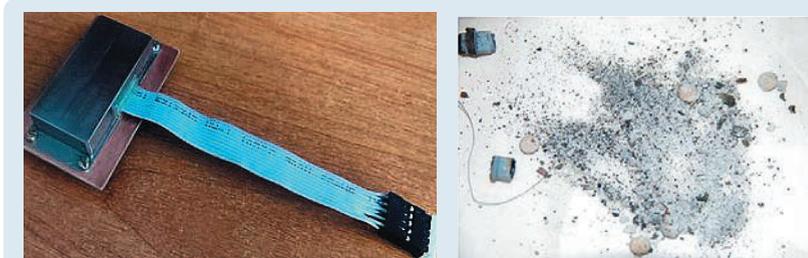
### МАЛОГАБАРИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭКСТРЕННОГО УНИЧТОЖЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Устройство представляет собой конструктивно законченное изделие, способное менее чем за 10 мс физически разрушить без возможности восстановления радиоэлементы, носители информации. Изделие изготавливается полностью на отечественной электронной компонентной базе и не имеет действующих аналогов.

Полученные технические решения направлены на экспертизу ФИПС.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОЩНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

Проведены экспериментальные исследования взрывчатых составов (ВС) на основе индивидуального взрывчатого вещества ГАВ (CL-20). Данные составы имеют на 4–5 % более высокие начальные плотности и скорости детонации по сравнению с применяющимися в настоящее время мощными составами на основе октогена-

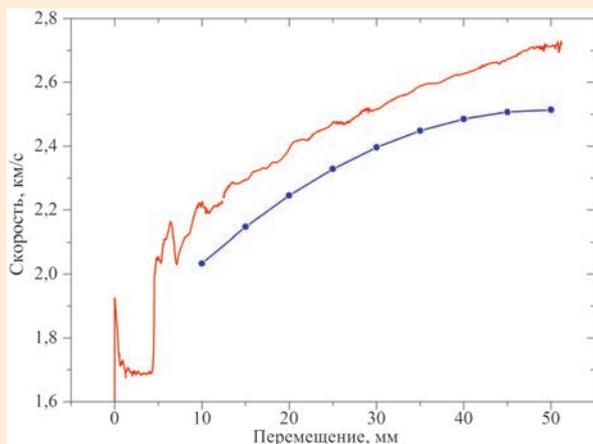


Внешний вид опытного образца устройства с имитатором разрушаемого носителя информации (слева) и результат работы устройства (осколки кристалла микросхемы)

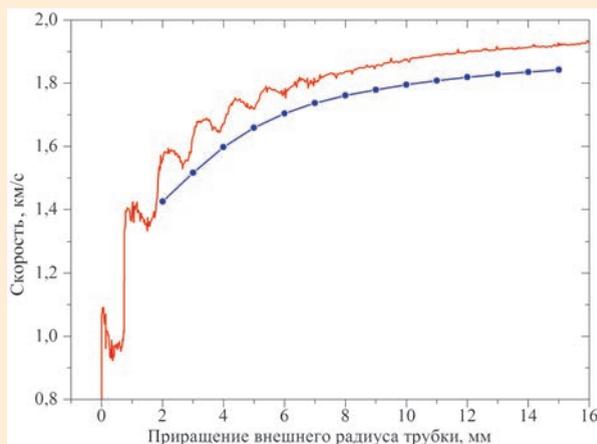
на, следовательно, метательная способность ВС на основе ГАВ также выше. На рисунках приведены результаты сравнительных экспериментов по исследованию метательного действия продуктов взрыва ВС на основе октогена и ГАВ. Видно, что метательная способность ВС на основе ГАВ примерно на ~10 % выше по сравнению с наиболее энергичным составом на основе октогена. Проведенные инженерные расчеты и математическое моделирование кумулятивных зарядов с взрывчатыми составами на основе ГАВ свидетельствуют об увеличении бронепробития на 7 % по сравнению с зарядом на основе октогена.

### ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТАНАЦИИ ВО ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Радиография с применением синхротронного излучения (СИ) позволяет «снимать» рентгеновское «кино» с частотой 8 МГц, т. е. получать рентгеновские снимки каждые 125 нс. Это свойство обусловлено применением для генерации СИ кольцевых ускорителей и чрезвычайно полезно при исследовании взрывных процессов.

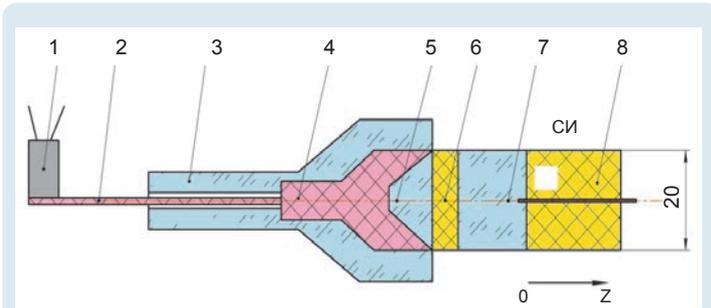


а



б

Зависимости скорости стальной пластины от перемещения (а) и скорости медной трубки от приращения ее внешнего радиуса (б): — — ВВ на основе ГАВ, —•— — ВВ на основе октогена



Экспериментальная сборка для исследования ударно-волнового возбуждения детонации:

1 – электродетонатор, 2–5 – генератор ударной волны, 6 – инициатор, 7 – преграда из оргстекла, 8 – исследуемый заряд ВВ

Рентгенографирование динамики перехода ударной волны (УВ) в детонационную (ДВ) осуществлялось с помощью СИ от ускорителя ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН) полоской с высотой 0,1 мм вдоль оси сборки с временем экспозиции ~1 нс. Как видно, применение СИ позволило в одном эксперименте получить информацию о скорости УВ в преграде, скорости инициирующей УВ и возбужденной ДВ, определить место перехода к детонации, а также получить информацию об УВ, распространяющейся в обратном направлении, что было невозможно при привлечении других методов.

Полученная информация полезна для развития расчетных моделей возбуждения детонации.

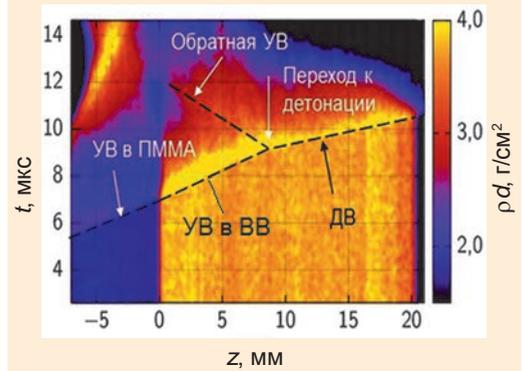
### НОВЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ

Разработан новый способ получения высокоэнергетических композитов, содержащих нанодисперсный алюминий.

Ультразвуковая обработка суспензии нанодисперсного алюминия в растворе, содержащем взрывчатое вещество, позволяет при определенных условиях получать композит,

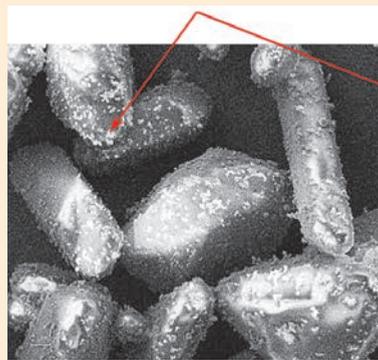
в котором частицы алюминия непосредственно включены в структуру высокоэнергетического материала. Такой характер распределения металлического компонента подтвержден разработанным методом контроля наличия частиц алюминия внутри кристаллов ВВ.

Полученные композиты могут представлять интерес для применения в ситуациях, когда требуется максимально быстрая кинетика взаимодействия металлического горючего с высокоэнергетическим компонентом. В частности, показана перспективность их применения в средствах лазерного инициирования.

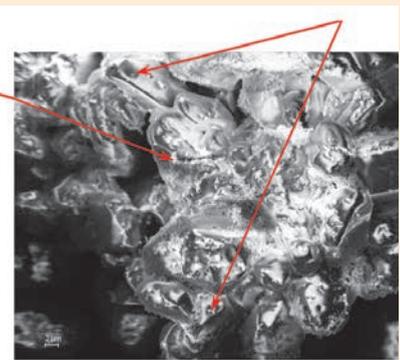


Динамика рентгеновской плотности вдоль оси заряда

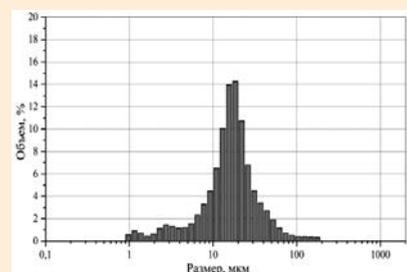
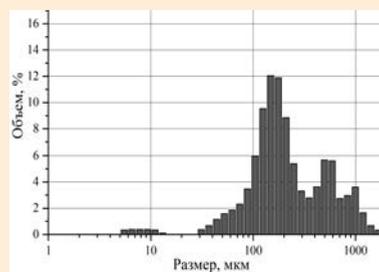
Частицы алюминия на поверхности кристаллов гексогена



Частицы алюминия, включенные в структуру кристалла гексогена



а



б

Электронные изображения алюминизированных композитов ВВ на основе гексогена (а) и гистограммы объемного распределения частиц по размерам в алюминизированном композите ВВ, соответствующие электронным изображениям (б)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ОТ ДИСПЕРСНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЯ

Выявлена аналогия в зависимостях энергии сигналов акустической эмиссии (АЭ) и параметров, характеризующих ударно-волновую чувствительность (УВЧ) октогена, от дисперсности наполнителя.

Наибольшие глубину возбуждения, время задержки детонации и, соответственно, наиболее низкую УВЧ имеют детали на основе октогена с соотношением крупной и мелкой фракций 50/50. Они же имеют максимальную суммарную энергию импульсов АЭ.

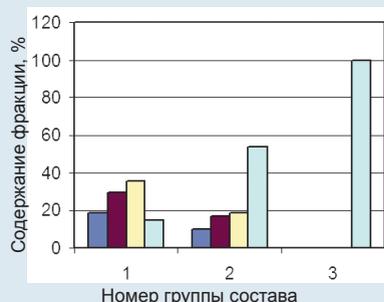
Полученные зависимости свидетельствуют об идентичности механизмов развития процесса деформирования ВВ при данных видах воздействия и могут стать основой развития нового направления в использовании метода АЭ для изучения механизмов деформирования ВВ в ударной волне, предшествующих началу взрывчатого превращения.

### О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ПОР И ДРУГИХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ОКТОГЕНА

Экспериментальные исследования полиморфного превращения октогена  $\beta \rightarrow \delta$  в зависимости от размера кристаллов проведены методами дифференциально-термического анализа и пикнометрическим методом измерения плотности кристаллов. Показано, что в условиях экспериментов воздействием ряда факторов (давления, изменения плотности материала, обусловленного присутстви-

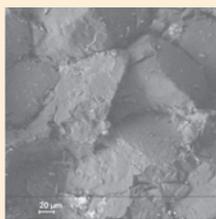
### Параметры акустической эмиссии и Ударно-волновой чувствительности

Соотношение фракций октогена крупная/мелкая, %	Суммарная энергия импульсов АЭ, усл. ед.	Глубина возбуждения детонации, мм	Время задержки детонации, мкс
50/50	1205520	$8 \pm 0,1$	$1,35 \pm 0,02$
100/0	299348	$7,6 \pm 1,2$	$1,23 \pm 0,05$
0/100	2378	$6,5 \pm 0,3$	$1,11 \pm 0,03$

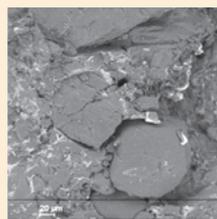


Содержание различных фракций октогена в составе групп:

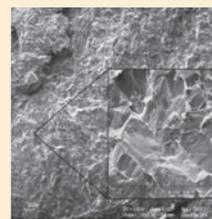
■ – более 350 мкм; ■ – 25–350 мкм; ■ – 10–25 мкм; □ – менее 10 мкм



а

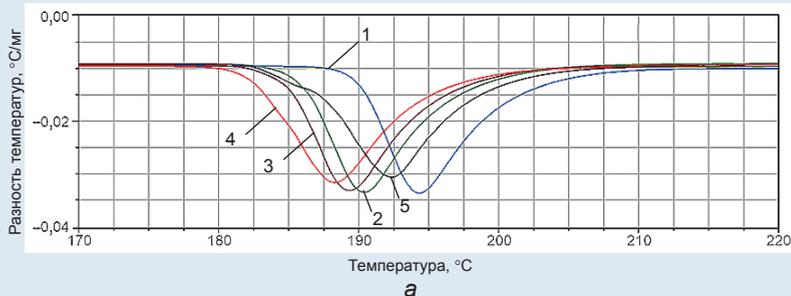


б

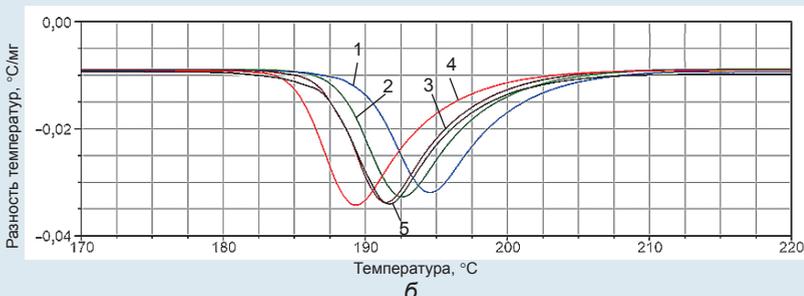


в

Электронные изображения поверхности деталей из ВВ на основе октогена в зоне их разрушения. Группы деталей: а – 1; б – 2; в – 3

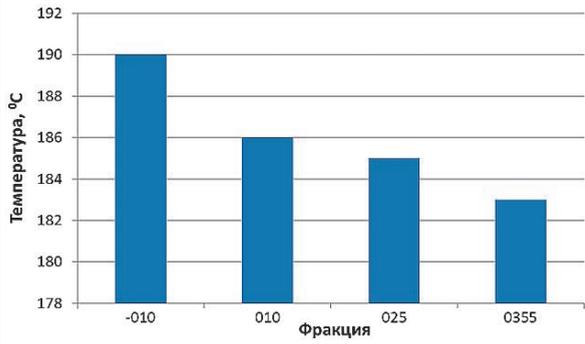


а

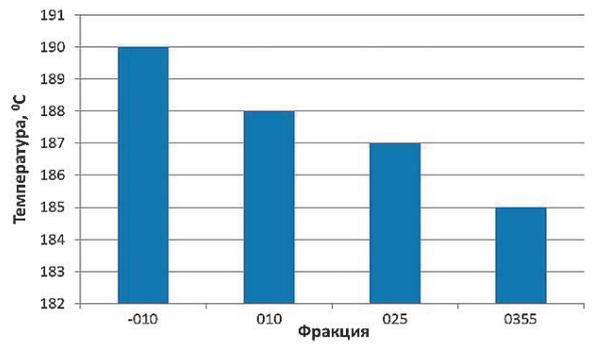


б

Кривые полиморфного превращения образцов ВВ № 1 (а) и № 2 (б) (октоген) для различных фракций: 1 – 010, 2 – 0190, 3 – 025, 4 – 0355, 5 – исходная



а



б

Температура начала полиморфного превращения различных фракций образцов № 1 (а) и № 2 (б) октогена

ем дефектов, поверхностной энергии) нельзя объяснить наблюдаемый размерный эффект.

Сделан вывод о том, что снижение температуры начала полиморфного превращения  $\beta \rightarrow \delta$  октогена на 5–7 °C при увеличении размеров кристаллов от 100 до 500 мкм может быть связано с зависимостью скачка энтальпии на фазовом переходе от структурных дефектов.

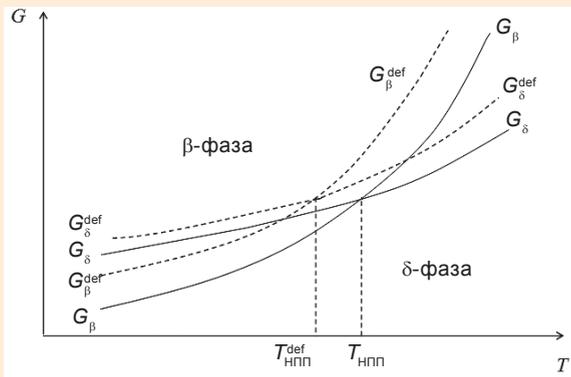


Электронно-микроскопическая фотография микропор и трещин, обнаруженных в кристаллах октогена (×11000)

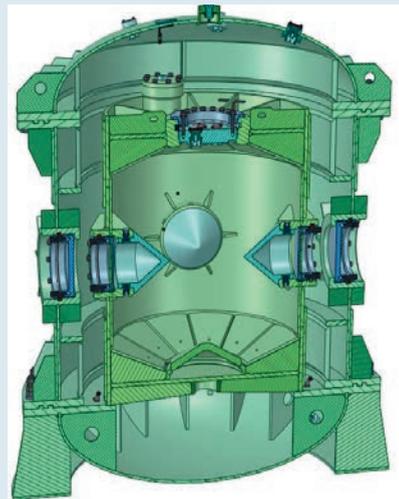
### ВЗРЫВОЗАЩИТНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ДВУХРАКУРСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ С НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДО 1 КГ ТЭ

Экспериментальную отработку прошла двухконтурная взрывозащитная камера (ВЗК) с несущей способностью 1 кг ТЭ. Конструкция ВЗК состоит из двух независимых контуров: внутренней камеры, воспринимающей импульсное (взрывное) воздействие, и внешней камеры, обеспечивающей герметичное удержание продуктов взрыва в случае аварийной разгерметизации внутреннего контура. Новые технические решения, заложенные в конструкции, защищены патентом РФ.

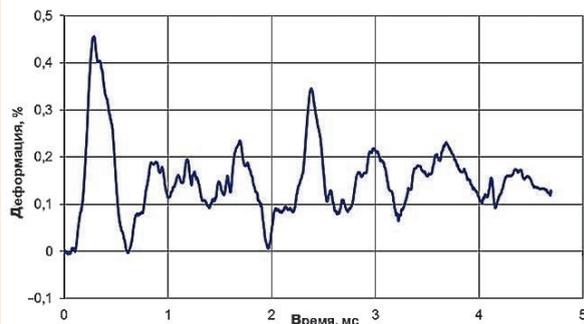
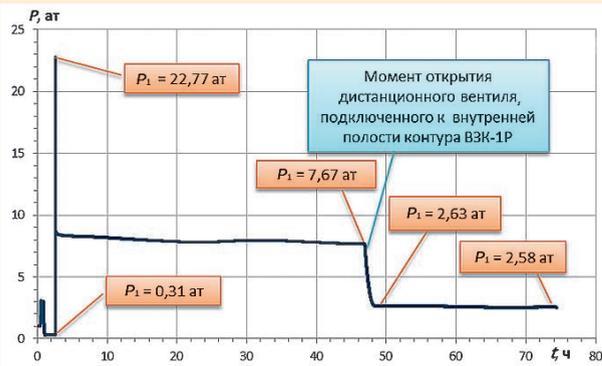
Экспериментальные исследования ВЗК при нагрузках, в 2 раза превышающих номинальные, подтвердили взрывостойкость внутренней камеры



Влияние структурных дефектов на вид функции свободной энергии Гиббса ( $G$ ) и температуру  $T_{HПП}$  полиморфного перехода  $\beta \rightarrow \delta$  в октогене



ВЗК-1Р (масса 3,6 т, Ø1,6 × 1,9 м)



Характерные графики давления и деформации, полученные в опыте с ВЗК-1Р на двухкратную нагрузку

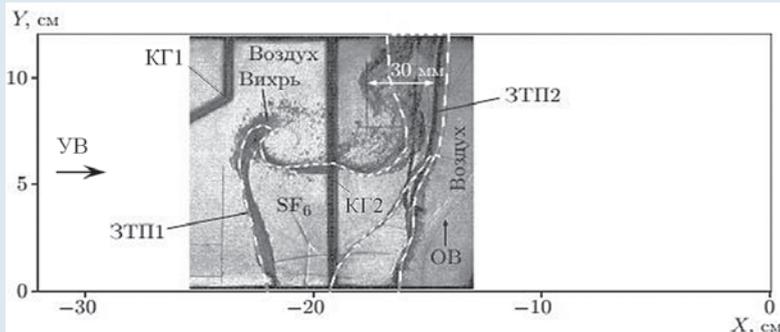
и показали, что конструкция сохраняет свою прочность и герметичность, элементы ее силового корпуса работают в области упругих и незначительных пластических деформаций.

При испытании нарастающим внутренним давлением газа внешняя камера сохранила герметичность при давлении  $\sim 20$  атм, что превышает ожидаемое расчетное значение давления в ее полости при мгновенном выходе горячих продуктов взрыва из внутренней камеры в случае разгерметизации.

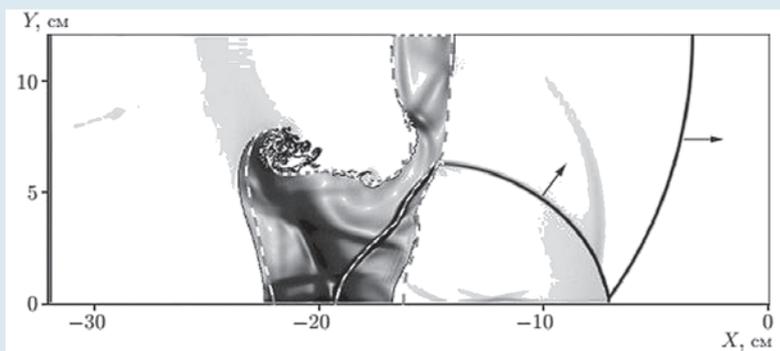
Конструкция ВЗК с повышенными требованиями к прочностной надежности будет применяться в качестве защитного контура в экспериментах по исследованию динамических свойств конструкционных материалов с использованием двухкратурной рентгенографии.

## РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

В мишенях инерциально-термоядерного синтеза при имплозии развиваются гидродинамические неустойчивости Рихтмайера – Мешкова, Кельвина – Гельмгольца, Рэлея – Тейлора. Эти неустойчивости со временем приводят к турбулентному перемешиванию



а



б

Экспериментальная (а) и расчетная (б) формы центрального слоя при регулярном взаимодействии ударной волны с контактными границами (КГ): штриховые линии – границы центрального слоя; стрелки – направление течения; ЗТП1, ЗТП2 – зоны турбулентного перемешивания на КГ1 и КГ2 соответственно; УВ – направление ударной волны; ОБ – отраженная волна

термоядерного горючего и оболочки мишени, что может препятствовать зажиганию горючего. Для расчета развития этих неустойчивостей применяются численные методы, которые должны быть протестированы

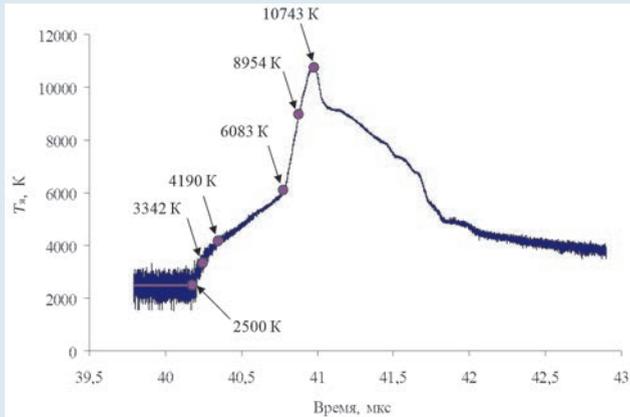
на экспериментальных данных. В ИФВ проведена серия экспериментов по исследованию развития неустойчивостей и турбулентности в слоистых газовых системах при двумерном течении, в котором одно-

временно действуют неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и Кельвина – Гельмгольца. Установлено, что в таких течениях динамика неустойчивостей достаточно сложная. Отработка технологии счета позволила протестировать методики ИТМФ и получить удовлетворительное согласие эксперимента и расчета.

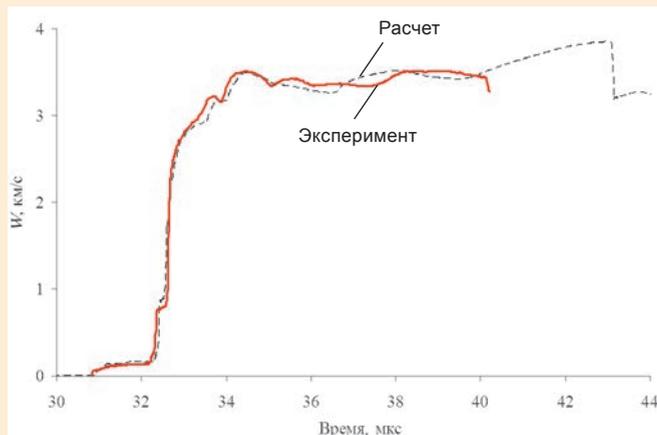
### КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ ПРИ ПОСТОЯННОЙ КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ $\sim 21000$ К В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 600 ГПа

Представлены данные по квазиизоэнтропической сжимаемости сильно-неидеальной плазмы гелия в области давлений 250–600 ГПа в устройствах цилиндрической геометрии. Впервые в практике подобных исследований измерены температура на фронте цилиндрической ударной волны в гелии  $T \sim 10000$  К и скорость полета внутреннего каскада  $W \sim 3,5$  км/с, в полости которого и достигается максимальная плотность сжатой плазмы. Тщательная проработка конструкций экспериментальных устройств позволила получить данные о сжатии неидеальной плазмы гелия до плотности  $\rho \approx 3$  г/см<sup>3</sup> при приблизительно постоянной конечной температуре  $T \sim 21000$  К.

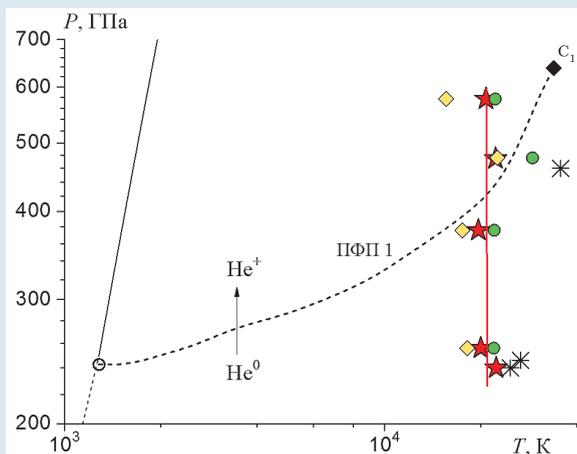
Траектории движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировались с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Плотность плазмы гелия определялась по измеренному радиусу оболочек в момент их «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих



Экспериментальная яркостная температура на фронте ударной волны в плазме гелия в зависимости от времени



Скорость движения внутренней границы оболочки экспериментального устройства



Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия. Эксперимент: \* – [1], ★ – данные ИФВ 2022 г., — — средняя изотерма  $T_{cp} = 21045$  К.

Расчет: ---- — граница плазменного фазового перехода из атомарного состояния гелия в состояние однократно ионизованной плазмы [2], ◆ — критическая точка плазменного фазового перехода [2], ○ — гипотетическая тройная точка [2], ◇ — расчет температуры в химической модели, ● — то же с использованием УРС квантовой молекулярной динамики [3]

реальные характеристики экспериментальных устройств.

Проведены сравнительные расчеты параметров квазиизоэнтропического сжатия по двум теоретическим моделям: традиционной химической модели плазмы и в рамках «первопринципного» подхода – квантовой молекулярной динамики.

В ходе исследования аномалия экспериментальных данных в области давлений теоретически предполагаемого плазменного фазового перехода в гелии не зарегистрирована.

### Список литературы

1. Жерноклетов М. В., Грязнов В. К., Аринин В. А. и др. Квазиизоэнтропическое сжатие плотного газообразного гелия в области давлений до 500 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 479–483.

2. Эбелинг В., Фёрстер А., Фортов В. Е. и др. Теплофизические свойства горячей плотной плазмы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.

3. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. Квазиизоэнтропическое сжатие неидеальной плазмы дейтерия и его смеси с гелием в области давлений до 250 ГПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. С. 1118.

### ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВОЙНИКИ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Предложена упрощенная расчетная схема нагружающего устройства [1] для исследования квазиизоэнтропического сжатия неидеальной плазмы (гидродинамический двойник). Она позволяет моделировать движение оболочек первого и второго каскадов с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода.

Преимуществом такого подхода является большая прозрачность и удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в газодинамических опытах с полусферическими макетами нагружающих устройств и в опытах с цилиндрическими устройствами с измерительным приемником на оси.

С использованием УРС САНА для He, D<sub>2</sub> и полученных входных данных о гидродинамическом двойнике проведе-

на серия расчетов по двум независимым расчетным кодам разработки ИПХФ РАН: 1D-PIС [2] – код, основанный на методе конечно-размерных частиц в ячейке на неподвижных прямоугольных регулярных сетках, и код BIG2 [3], в основе которого лежит метод Годунова для четырехугольных криволинейных подвижных адаптивных сеток.

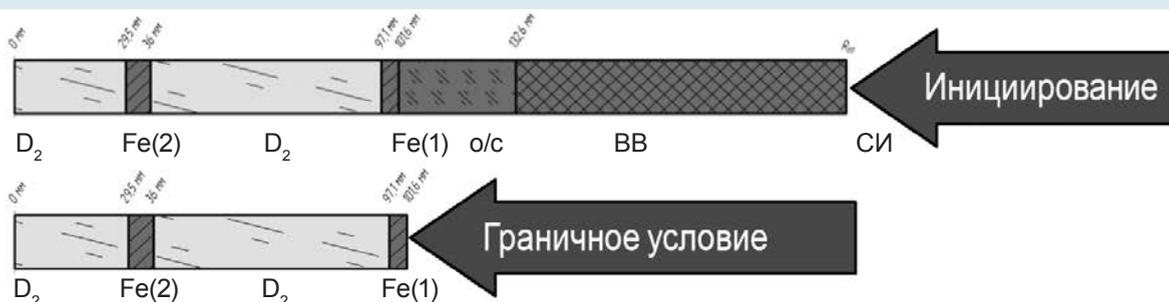
Показана возможность использования гидродинамических двойников нагружающих устройств для перекрестных расчетов с целью верификации уравнений состояния.

### Список литературы

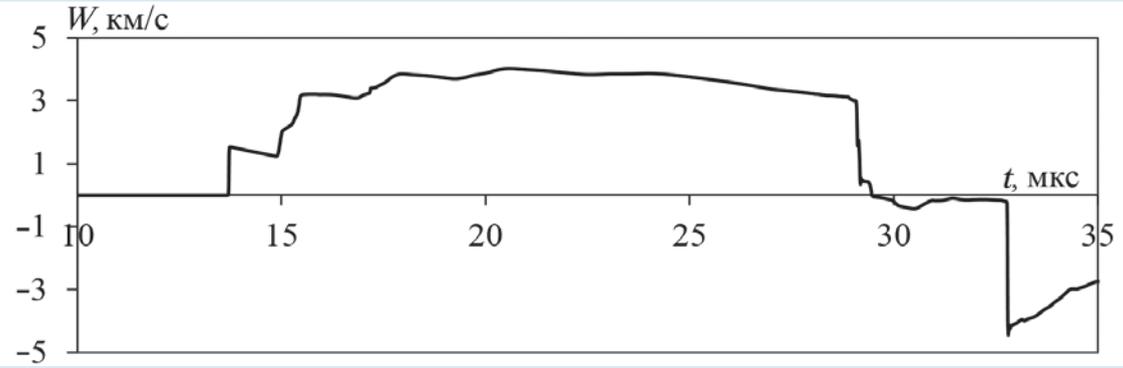
1. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. С. 735.

2. Fortov V. E., Kim V. V., Lomonosov I. V. et al. Numerical modeling of hypervelocity impacts // Int. J. Impact Eng. 2006. Vol. 33, Issues 1–12. P. 244–253.

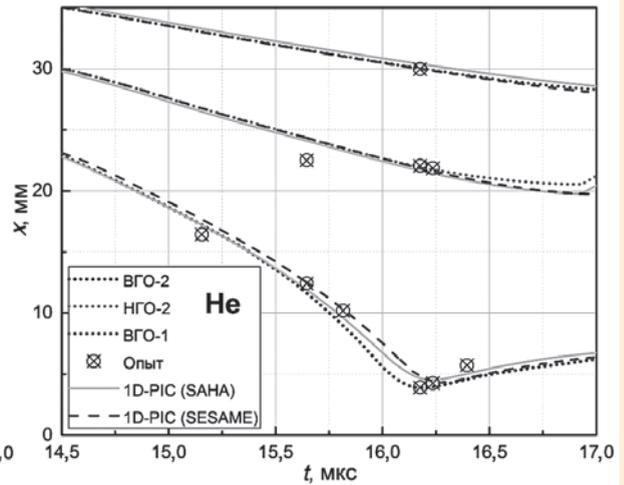
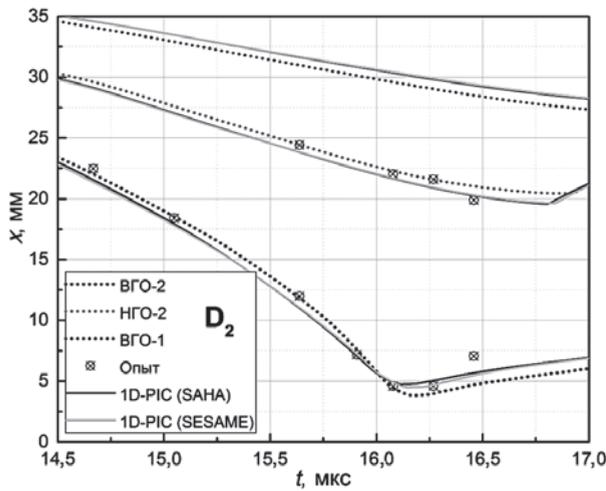
3. Fortov V. E., Goel B., Munz C. D. et. al. Numerical simulations of nonstationary fronts and Interfaces by the Godunov method in moving grids // Nucl. Sci. Eng. 1996. Vol. 123, Issue 2. P. 169.



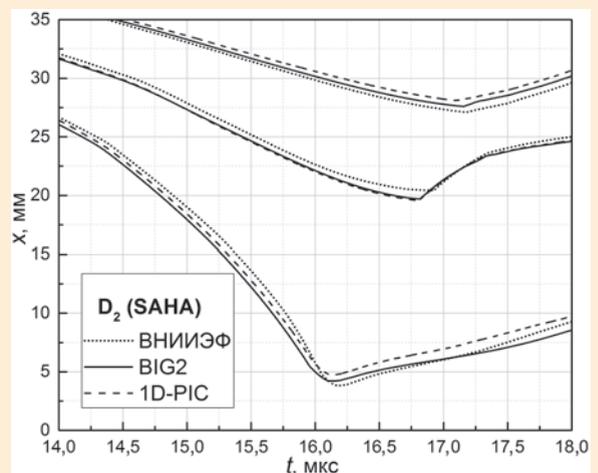
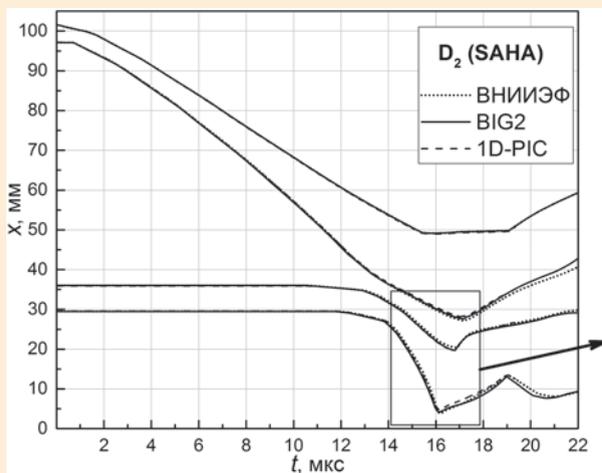
Одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника



Зависимость скорости от времени, задаваемая как правое граничное условие



Результаты численного моделирования 1D-PIC обжатия  $D_2$  и He с использованием УРС SAHA и SESAME



Результаты численного моделирования 1D-PIC и BIG2 обжатия  $D_2$  с использованием УРС SAHA. Справа – более подробно в окрестности точки останова

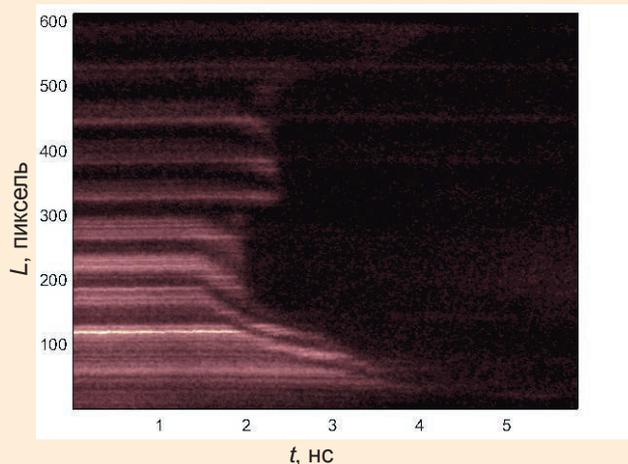
## ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

### ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИМАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ»

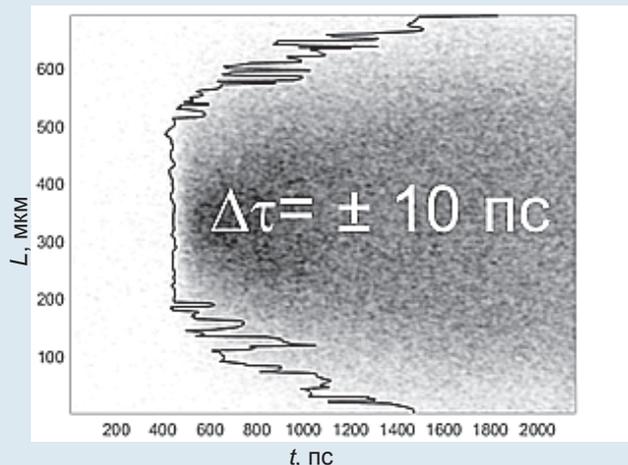
Проведен цикл исследований уравнения состояния конструкционных материалов. Отработаны конструкции мишеней с интегральной толщиной до 200 мкм, обеспечивающие в комплексе с организацией заданной пространственно-временной структуры излучения, фокусируемого на мишень, отсутствие предварительного прогрева исследуемого материала, стационарность и одномерность нагрузки в пределах области с линейным размером до 300 мкм. Использование мишени с аблятором из малоплотного органического материала обеспечило более чем двукратный рост давления при той же вложенной энергии излучения в экспериментах без применения аблятора такого типа, реализовав давления в десятки мегабар. В экспериментах использовались мишени с образцами материалов, полученные без нарушения внутренней структуры. Для сборки использовались монотолщинные образцы, осуществлялся контроль всех технологических процессов изготовления мишеней. Уточнены и исправлены дисторсия и нелинейность скорости развертки фотохронографического комплекса, влияющие на погрешность измерения. В результате комплексного подхода в экспериментах обеспечена погрешность измерений скорости ударной волны на уровне 1–2 %.

### МНОГОКАНАЛЬНЫЙ НЕУПРАВЛЯЕМЫЙ РАЗРЯДНИК НОВОГО ТИПА ДЛЯ НАНОСЕКУНДНОЙ КОММУТАЦИИ МЕГААМПЕРНЫХ ТОКОВ

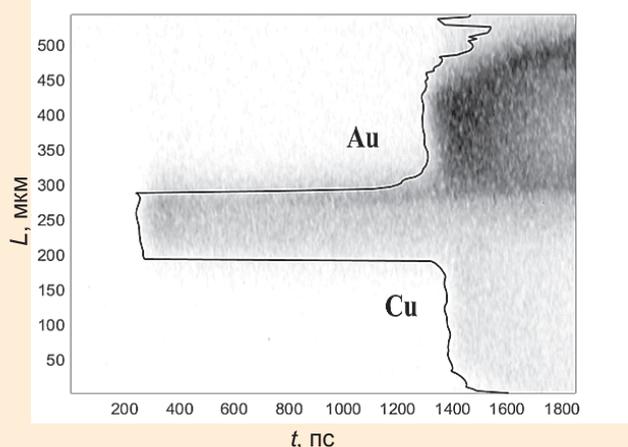
Разработан многоканальный неуправляемый разрядник, основанный на поэтапном пробое



Исследования базовой конструкции на предмет предварительного прогрева (изгиб полос излучения интерферометрической подсветки на образце меньшей толщины свидетельствует о нагреве материала)



Равномерность ударной волны на выходе из мишени CH/Au



Выход ударной волны из структурированной мишени CH/Cu/Au

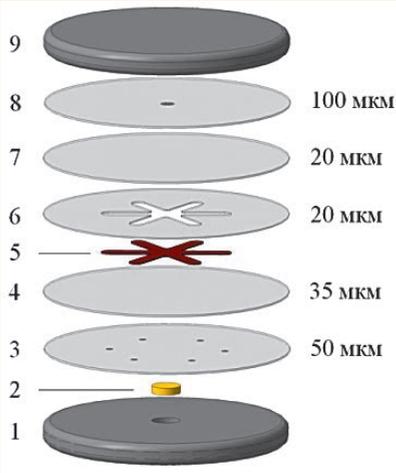
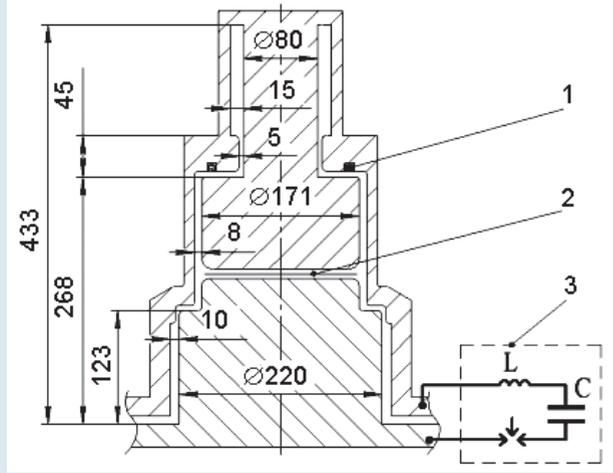
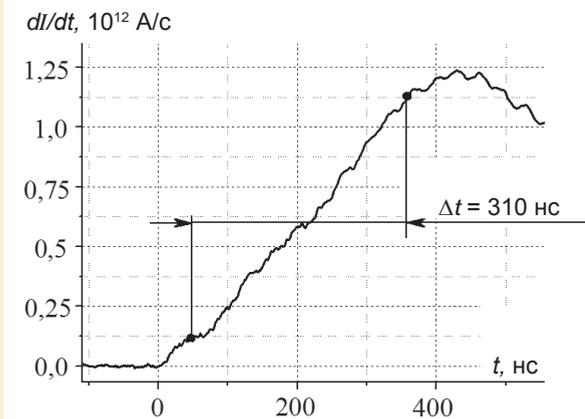


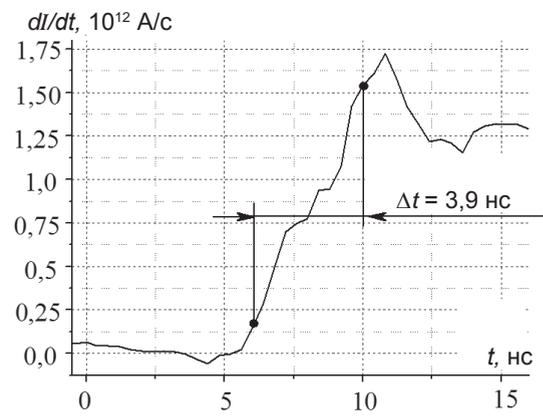
Схема компоновки шестиканального разрядника на 38 кВ



Геометрия коаксиальной линии и схема включения в разрядный контур: 1 – индивидуальные датчики, 2 – место расположения разрядника, 3 – конденсаторная батарея



а



б

Осциллограммы фронтальной части импульсов производной тока в тестовом эксперименте (а) и в эксперименте с разрядником (б)

многослойного пленочного изолятора с вложенной пластиной из фольги, находящейся под плавающим потенциалом. Разрядник обладает наносекундным временем срабатывания и может применяться для обострения фронта импульса напряжения в электроразрядных устройствах с мегаамперными токами. Использовать аналогичный способ формирования многоканального пробоя можно при разработке наносекундных коммутаторов мультимегаамперных токов по направлениям термоядерных исследований с применением взрывомантных генераторов энергии.



а

б

Фотографии высоковольтной части разрядника (а) и заземляемого электрода (б) после опыта

### ПРЕЦИЗИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ

Разработан прецизионный метод исследования уравнений состояния материалов при ударном нагружении в мегабарном диапазоне давлений.

Нагружение обеспечивается разогнанным током дискового взрывомагнитного генератора цилиндрическим лайнером. Одновременно идентичному воздействию подвергаются до 6 образцов из различных материалов, выполненных в виде соосных с лайнером колец. Скорость лайнера регистрируется многоканальной методикой PDV с погрешностью  $\leq 0,5\%$ , скорость ударных волн в исследуемых образцах – оптоволоконными зеркальными контактными датчиками с пространственно-временным разрешением  $\sim 100$  мкм и 0,1 нс.

В опыте получены данные по уравнению состояния кварца и меди с погрешностью  $\leq 1\%$  при давлениях 1–1,5 Мбар.

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАСВЕЧЕННОЙ ФОТОБУМАГИ

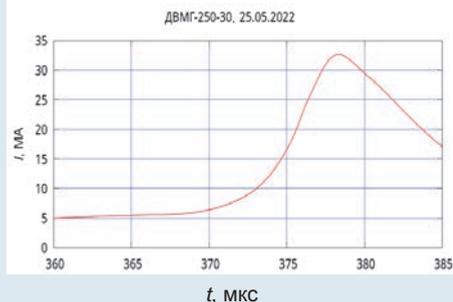
Предложен метод регистрации пространственного распределения рассеянного из лазерной плазмы излучения в телесном угле  $\sim 4\pi$  с использованием фотобумаги, на которой при воздействии остается ожог.

Для калибровки чувствительности методики экспериментально получена зависимость яркости ожога от интенсивности греющего излучения.

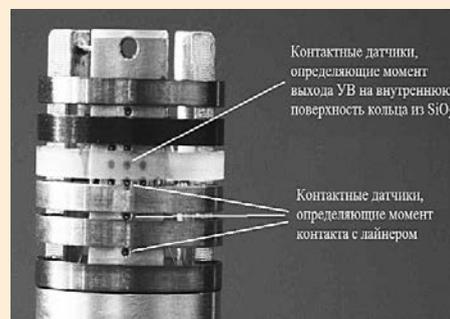
С помощью представленной методики в одном из экспериментов получена круговая диа-



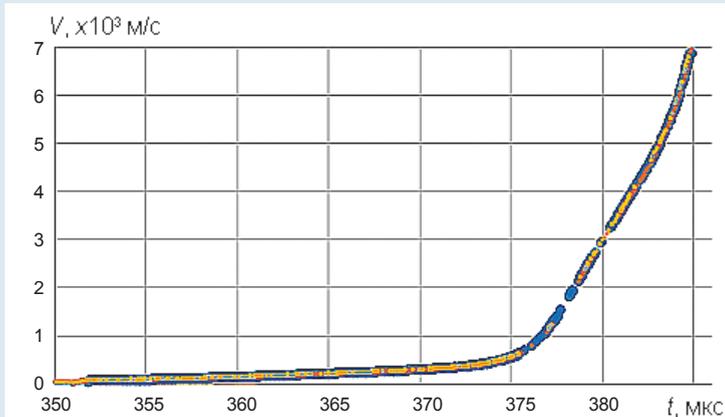
Внешний вид экспериментального устройства



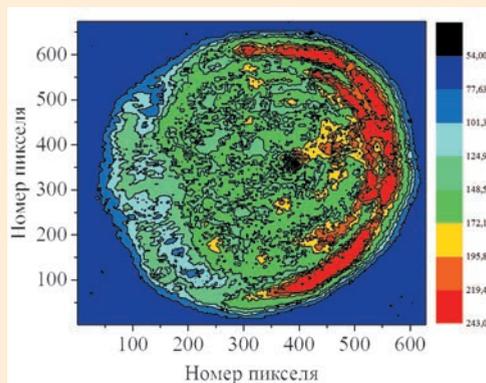
Импульс тока в лайнере



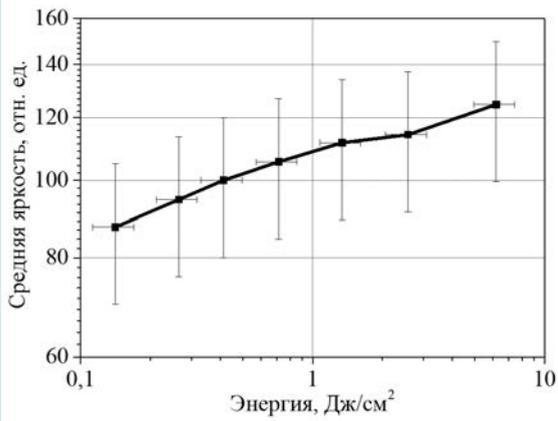
Внешний вид ударного измерителя



Скорость движения лайнера (5 точек регистрации)



Сканированное (слева) и оцифрованное изображение ожога



Зависимость яркости ожога от интенсивности излучения

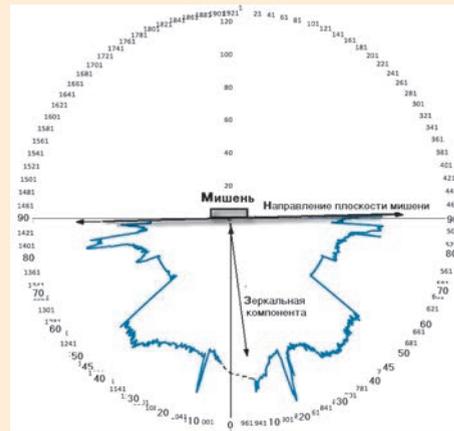
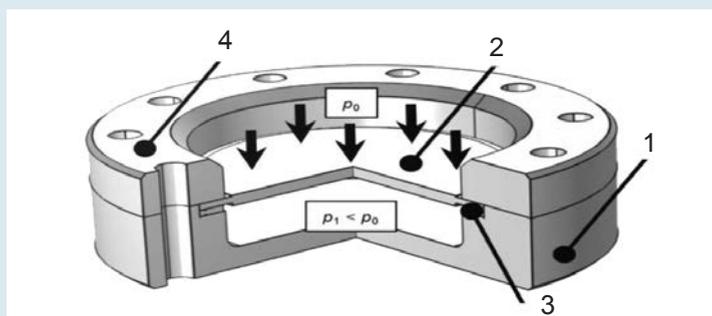


Диаграмма направленности рассеянного излучения, полученная при сканировании ожогов на фотобумаге

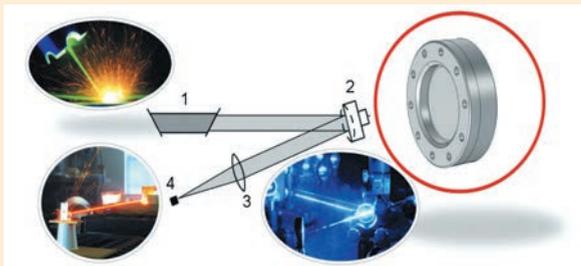
грамма направленности рассеянного излучения.

### ЗЕРКАЛО С ИЗМЕНЯЕМОЙ КРИВИЗНОЙ

Разработан макет конструкции зеркала с изменяемой кривизной. Зеркало содержит корпус, отражающий элемент, уплотнительную прокладку и прижимное кольцо. Формование отражающей поверхности заданной кривизны происходит



Конструкция зеркала с изменяемой кривизной: 1 – корпус, 2 – отражающий элемент, 3 – уплотнительная прокладка, 4 – прижимное кольцо



Применение в лазерной резке металлов: 1 – лазер, 2 – зеркало с изменяемой кривизной, 3 – фокусирующая линза, 4 – образец

путем создания перепада давления между рабочей и тыльной сторонами отражающего элемента. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по яркости и размерам пятна в фокусе зеркала, полученных в лабораторных условиях при длине оптической трассы  $\sim 100$  м, показало их удовлетворительное согласие. Зеркало с изменяемой кривизной может применяться в качестве устройства для лазерной резки металлов, concentra-

ции лучистой энергии, телескопа, прожекторной установки и т. п.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИШЕНЕЙ С ОБРАЩЕННОЙ КОРОНОЙ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЙОДНОГО ЛАЗЕРА С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Создана принципиально новая серия мишеней с обращенной короной (МОК) с применением метода плазмохимии для

нанесения рабочего покрытия с целью обработки элементов, предназначенных для исследований на мощной лазерной установке нового поколения. Результаты экспериментальных исследований данной серии мишеней на двухканальной камере установки «Искра-5» показали, что переход на вторую гармонику излучения и новую технологию нанесения покрытия не оказывают заметного влияния на интегральный нейтронный выход в экспериментах в пределах погрешности измерений.

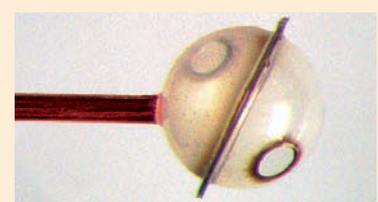
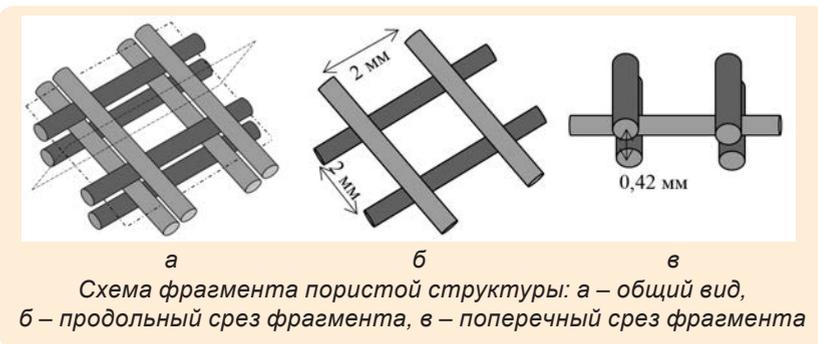


Фото собранной мишени  $\varnothing 2$  мм

### ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ

В связи с перспективностью использования метода напирания жидкого вещества на твердую поверхность пористой структуры необходимо оценить максимальную массу покрывающего жидкого слоя. Пористая структура представляет собой сетку, образованную тонкими проволоками.

Исследование покрытия пористой системы в однородном поле силы тяжести требует информации о поверхностном натяжении жидкости и сводится к рассмотрению подзадач моделирования равновесной формы цилиндрической капли в нескольких конфигурациях: на поверхности цилиндра и между цилиндрами в горизонтальном и вертикальном положениях.



На основе проведенных расчетов при оценке массы покрывающего конструкцию тонкого слоя воды с коэффициентом пористости 85 % максималь-

ная масса воды, приходящаяся на 1 см<sup>3</sup> пористого материала, составляет 0,105 г.

## ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

### РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА КОРПУС АКТИВНОЙ ЗОНЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВИР-2М

В рамках модернизации импульсного ядерного реактора (ИЯР) с растворной активной зоной (АЗ) ВИР-2М разработана рабочая конструкторская документация на новый корпус активной зоны.

Основными отличительными особенностями нового корпуса АЗ являются:

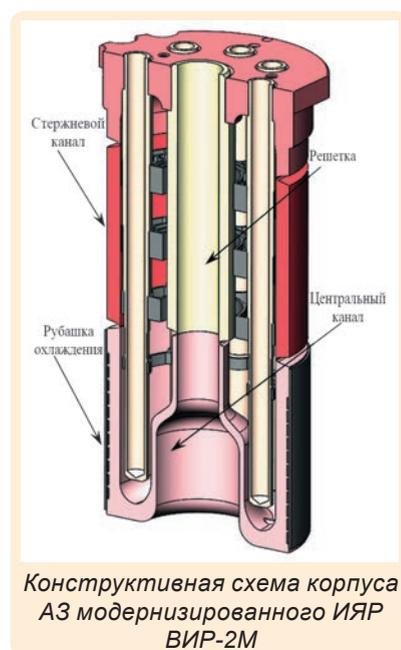
1) наличие сквозного центрального канала с максимальным внутренним диаметром 400 мм, предназначенного для размещения испытываемых объектов;

2) восемь стержневых каналов, в которых размещаются стержни управления реактором;

3) четыре решетки, предназначенные для фиксации стержневых каналов и снижения ударного давления на крышку корпуса, обусловленного вскипанием и разлетом топливного раствора при генерировании импульса делений.

В модернизированном реакторе объем топливного раствора составит 170 л, энерговыделение в импульсе – 120 МДж (в 2 раза больше, чем в действующем), максимальная мощность в длительном статическом режиме (при включенной системе охлаждения) – 20 кВт.

Проведены расчеты прочности корпуса АЗ при нагружении внутренним импульсным (возникающим при генерации



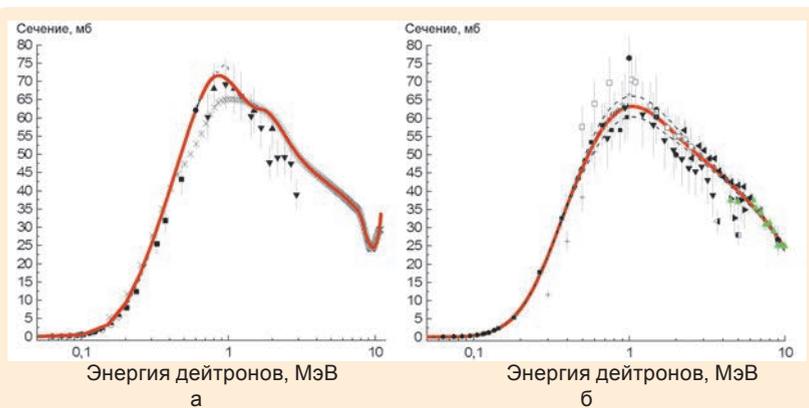
импульса делений) и статическим (при проведении гидравлических испытаний) давлением. Выполнен расчет тер-

момеханических напряжений, возникающих в корпусе АЗ при работе реактора в длительном статическом режиме. Проведен расчет изгиба стержневых каналов при работе реактора в импульсном режиме. Показано, что запас прочности корпуса АЗ модернизированного ИЯР ВИР-2М во всех проектных режимах работы реактора удовлетворяет требованиям действующей нормативной документации.

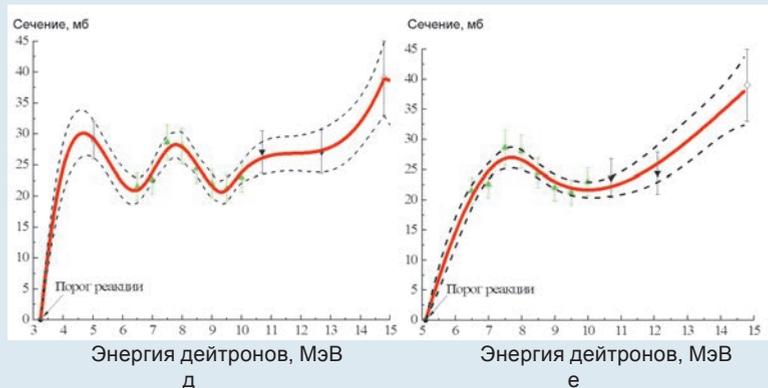
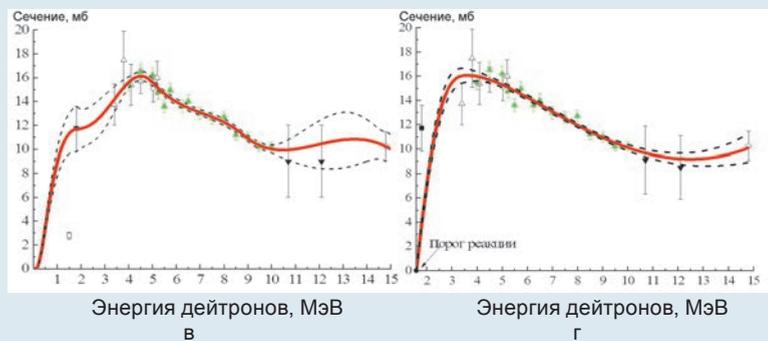
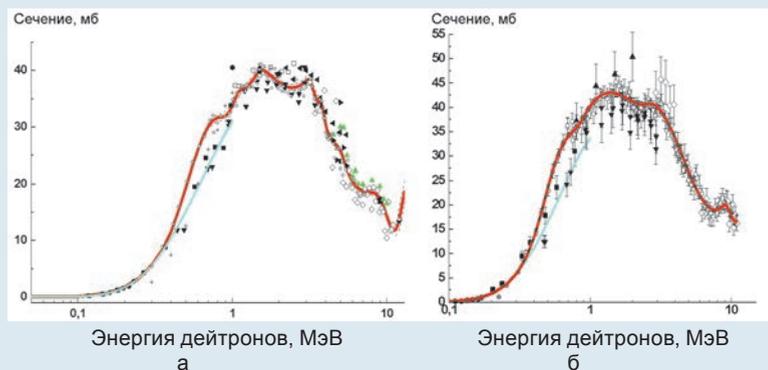
### ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЙТРОНА С ЯДРОМ ${}^6\text{Li}$

Впервые получена оценка интегральных сечений реакций  ${}^6\text{Li}(d, p_0){}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}(d, p_1){}^7\text{Li}^*$  (0,478 МэВ),  ${}^6\text{Li}(d, p_2){}^7\text{Li}^*$  (4,63 МэВ),  ${}^6\text{Li}(d, p_4){}^7\text{Li}^*$  (7,46 МэВ) и соответствующих им зеркальных реакций  ${}^6\text{Li}(d, n_0){}^7\text{Be}$ ,  ${}^6\text{Li}(d, n_1){}^7\text{Be}^*$  (0,429 МэВ),  ${}^6\text{Li}(d, n_2){}^7\text{Be}^*$  (4,57 МэВ),  ${}^6\text{Li}(d, n_4){}^7\text{Be}^*$  (7,21 МэВ), а также реакции  ${}^6\text{Li}(d, x){}^7\text{Be}$  для энергий налетающих дейтронов от пороговых значений до 15 МэВ. Оценка выполнена математическими средствами электронной библиотеки SaBa (Sarov Base), разработанной в ИЯРФ. При проведении оценки опорными являлись результаты измерений ИЯРФ, на которые в ряде случаев были нормированы литературные данные. До настоящих исследований достоверные оценки в интервале от 0 до 15 МэВ имелись только для сечений реакций  ${}^6\text{Li}(d, p_{0,1})$ . Для реакций  ${}^6\text{Li}(d, p_{2,4})$ ,  ${}^6\text{Li}(d, n_{2,4})$  оцененные данные отсутствовали ввиду скудности наборов экспериментальных сечений – имелось лишь несколько точек при отдельных значениях энергий менее 5 и более 11 МэВ.

В ИЯРФ проблема оценки решена на основе результатов измерений дифференци-



Оцененные и экспериментальные значения интегральных сечений зеркальных реакций  ${}^6\text{Li}(d, n_0){}^7\text{Be}$  (а) и  ${}^6\text{Li}(d, p_0){}^7\text{Li}$  (б): значки – экспериментальные и литературные данные, красная кривая – исследования 2022 г.



Оцененные и экспериментальные значения интегральных сечений зеркальных реакций  ${}^6\text{Li}(d, p_1){}^7\text{Li}^*$  (0,478 МэВ) (а),  ${}^6\text{Li}(d, n_1){}^7\text{Be}^*$  (0,429 МэВ) (б),  ${}^6\text{Li}(d, p_2){}^7\text{Li}^*$  (4,63 МэВ) (в),  ${}^6\text{Li}(d, n_2){}^7\text{Be}^*$  (4,57 МэВ) (г),  ${}^6\text{Li}(d, p_4){}^7\text{Li}^*$  (7,46 МэВ) (д),  ${}^6\text{Li}(d, n_4){}^7\text{Be}^*$  (7,21 МэВ) (е): значки – экспериментальные значения и литературные данные, красная линия – исследования 2022 г., голубая линия – расчет из Phys. Lett. B. 1993. Vol. 307. P. 20

альных (по углу) сечений образования протонов в реакции  ${}^6\text{Li} + d$  при энергиях дейтронов от 4 до 10 МэВ, выполненных на ускорителе ЭГП-10 с помощью системы телескопов кремниевых детекторов с разде-

лением вида регистрируемых заряженных частиц и с учетом приближенного равенства сечений зеркальных реакций, вытекающего из зарядовой независимости ядерных сил. С учетом этого свойства, а так-

же приближенного равенства  $\sigma({}^6\text{Li}(d, x){}^7\text{Be}) = \sigma({}^6\text{Li}(d, n_0){}^7\text{Be}) + \sigma({}^6\text{Li}(d, n_1){}^7\text{Be}^*)$  вычитанием оцененного сечения  ${}^6\text{Li}(d, n_1){}^7\text{Be}^*$  получены сечения  ${}^6\text{Li}(d, n_0){}^7\text{Be}$ .

## ИНСТИТУТ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (ИЦТ)

В 2022 г. ИЦТ РФЯЦ-ВНИИЭФ заканчивает разработку «базовой» версии «среднего» класса комплекса программ в защищенном исполнении «Система полного жизненного цикла "Цифровое предприятие"» (СПЖЦ) по техническому заданию на 2019–2022 гг.

Результатом работ является полностью импортонезависимый комплекс информаци-

онных систем в защищенном исполнении, решающий задачи по управлению жизненным циклом изделия в сквозной технологии 3D-проектирования от идеи до выпуска и эксплуатации.

Комплекс программ СПЖЦ ориентирован в первую очередь на предприятия ОПК России. Ожидаемыми эффектами от внедрения являются:

– реализация управления

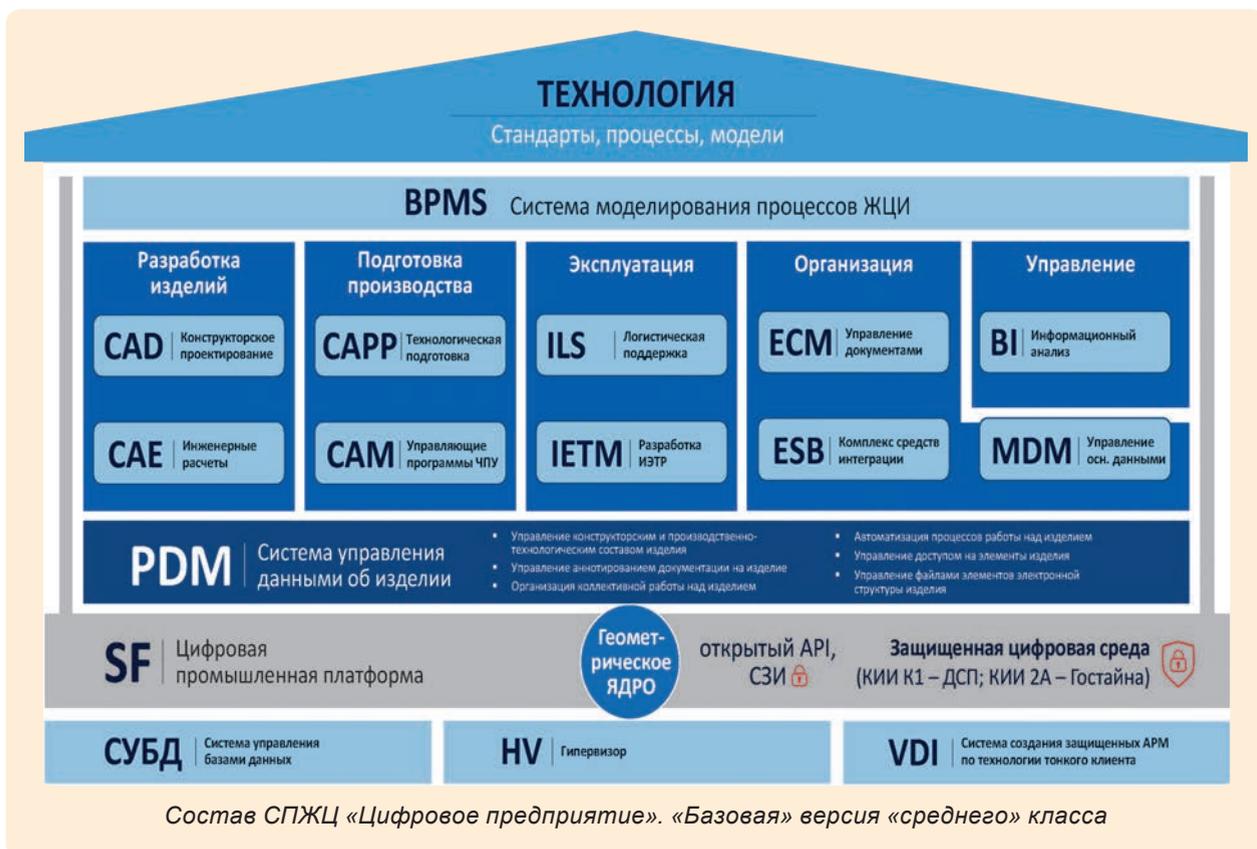
полным жизненным циклом изделия;

– повышение качества производимой продукции;

– возможность обработки информации до уровня «гостайна»;

– парирование угроз информационной безопасности;

– снижение себестоимости продукции.



## КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

### НЕЙТРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Разработаны способы получения перспективных композиционных материалов, предназначенных для радиационной защиты. В частности, с помощью данных способов получены высокодисперсные порошки с частицами сферической формы на основе линейного полиэтилена высокого давления и нитрида бора в качестве нейтропоглощающей добавки. В зависимости от выбранного способа получения массовое содержание бора может меняться от 0 до 30 % при среднем размере частиц от 200 до 400 мкм. Материалы могут применяться в космической и атомной отраслях, а также авиации, судостроении.

Преимущества нейтрозащитных материалов на полимерной основе по сравнению с имеющимися аналогами:

- высокая степень защиты от нейтронного излучения за счет высокого содержания активного наполнителя;
- низкая плотность порошкового материала, способствующая снижению массы заполненных им конструкций;

- высокая инертность, устойчивость к коррозии;
- равномерное заполнение объемов произвольной формы благодаря сферической форме частиц;
- широкий диапазон температуры эксплуатации в различных климатических условиях;
- доступность исходных компонентов на российском рынке поставщиков.

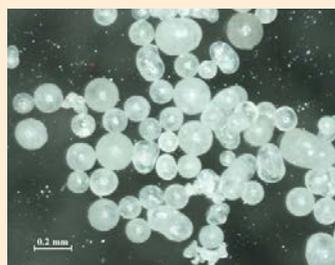
Разработка получила золотую медаль Международного салона изобретений и новых технологий «Новое время», проходившего 22–24 сентября 2022 г. в Севастополе, а также специальный приз Федерации космонавтики России.

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

В рамках создания программно-технических средств для экспериментальной отработки и проверки тактико-технических характеристик исследуемых образцов с целью ускорения работ по проектированию, отладке и внедрению сложных технических систем, сокращению мате-

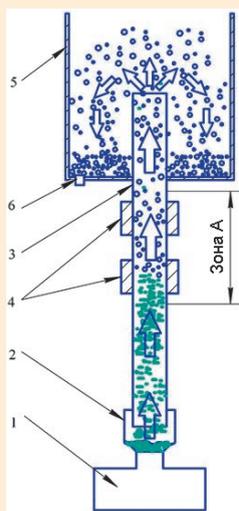
риальных затрат и повышению качества разработан универсальный стендовый комплект (УСК). Он обеспечивает повышение эффективности и качества создания образцов сложных технических систем, отвечающих современным требованиям по надежности и безопасности. В основе УСК лежит программно-аппаратная модель, обеспечивающая имитацию сложных технических систем и среды функционирования. Комплект прошел полный цикл отработки, испытаний и принят в эксплуатацию для обеспечения испытаний изделий заказчика на комплексном стенде универсальной корабельной системы управления стрельбой.

В качестве одного из приоритетных направлений в подготовке специалистов эксплуатирующих организаций является широкое применение в процессе обучения тренировочных и тренажерных средств и совершенствование форм и методов обучения с их помощью. Это обусловлено, прежде всего, наличием современной, обладающей высокими боевыми качествами, оснащенной сложнейшими агрегатами, приборами и системами боевой и другой техники, осво-



а

Сферические частицы материала (а) и колонна для его получения по одному из способов (б): 1 – модуль создания газового потока, 2 – емкость с полуфабрикатом, 3 – труба; 4 – нагреватели зоны А, 5 – охладитель, 6 – люк для выгрузки продукта



б



Универсальный  
стендовый  
комплект



Комплект учебно-тренировочных средств

ение которой требует от личного состава глубоких знаний и твердых практических навыков при эксплуатации и боевом применении. Использование учебно-тренировочных средств (УТС) позволяет организовать управляемый учебный процесс путем усложнения или упроще-

ния учебных задач, изменения их тематики, многократного повторения условий выполнения задания, организации автоматического контроля за выполнением алгоритмов деятельности обучаемых, отработки действия в штатных и аварийных режимах и т. д. Наряду с этим прин-

ципально новые возможности открыло применение в тренажерах и УТС компьютеров с моделирующими программами, использующими математическую/имитационную модель физических процессов событий и обеспечивающую динамичность построения УТС.

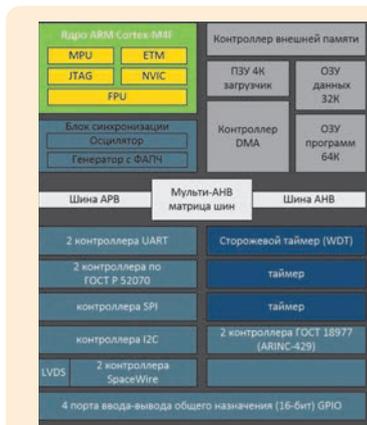
## НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (НИИС) им. Ю. Е. Седакова

### РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОТЕЧЕСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ МИКРОПРОЦЕССОРА НА ОСНОВЕ ЯДРА ARM СО ВСТРОЕННЫМИ ИНТЕРФЕЙСАМИ В КОМПАКТНОМ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОМ КОРПУСЕ

Завершена разработка микропроцессора на основе ядра ARM со встроенными интерфейсами в малогабаритном корпусе (далее – микросхемы), предназначенного для применения в аппаратуре телеметрии, космической аппаратуре и других образцах бортовой радиоаппаратуры. Готовится серийное изготовление микросхемы.

Микропроцессор 1914BM024 базируется на 32-разрядном процессорном RISC ядре с архитектурой ARM Cortex-M4F, включает в состав контроллера интерфейсов UART, I2C, SPI, МКИО, GPIO, DMA, блоки ОЗУ программ и данных, а также генератор с ФАПЧ.

Частота тактового сигнала микросхемы 60,0 МГц, номинальное напряжение питания 3,3 В. Микросхема выполнена в компактном металлокерамическом 120-выводном планарном корпусе и работает в диапазоне температур от минус 60 до 85 °С.



Состав и внешний вид интерфейсов микропроцессора на основе ядра ARM 1914BM024

### СОЗДАНИЕ МИКРОСХЕМЫ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА 1359EY044

Завершена разработка радиационнотстойкой интегральной микросхемы, предназначенной для управления

ключами двухтактного полумостового резонансного инвертора, стабилизация в котором осуществляется методом частотной модуляции импульсов управления за счет обратной связи по напряжению. Резо-

Электрические параметры микросхемы

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Выходное напряжение источника опорного напряжения REF1, В (при $U_n = 24,0$ В; $I_{оп} = 10$ мА)	$U_{оп}$	4,9	5,1
Нестабильность источника опорного напряжения REF1 по входному напряжению, %/В (при $U_{п1} = 16$ В, $U_{п2} = 36$ В)	$K_{Uоп}$	–	0,05
Напряжение внутреннего источника питания драйвера, В (при $U_n = 24,0$ В)	$U_{пдв}$	8	10
Время нарастания импульса выходного напряжения, нс (при $U_n = 36$ В, $F_r = 500$ кГц, $C_H = 3,3$ нФ)	$t_{нар}$	–	150
Время спада импульса выходного напряжения, нс (при $U_n = 36$ В, $F_r = 500$ кГц, $C_H = 3,3$ нФ)	$t_{сп}$	–	120
Остаточное напряжение выходного каскада при втекающем токе, В (при $U_n = 24$ В, $U_{пдв} = 12$ В, $I_{вт} = 100$ мА)	$U_{ост.вт}$	–	0,75
Остаточное напряжение выходного каскада при вытекающем токе, В (при $U_n = 24$ В, $U_{пдв} = 12$ В, $I_{выт} = 50$ мА)	$U_{ост.выт}$	–	0,75
Ток потребления, мА	$I_{пот}$	–	7



Внешний вид микросхемы резонансного инвертора 1359EY044

нансный инвертор предназначен для применения в силовых блоках радиоэлектронной аппаратуры. Готовится серийное производство микросхемы, работающей в диапазоне температур от минус 60 до 100 °С.

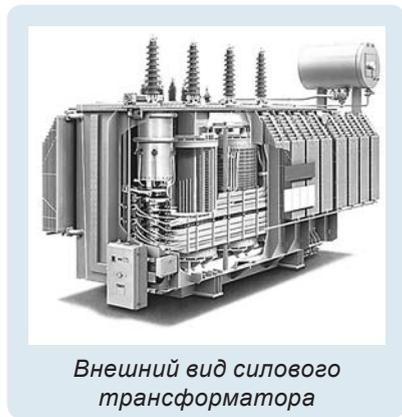
### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Математическая модель тепловых процессов силового масляного трансформатора разработана в рамках инвестиционного проекта «Создание системы предиктивной диагностики трансформаторного оборудования (СПД-Т)». Объектом моделирования является одно- или трехфазный силовой масляный трансформатор с заданными характеристиками. Модель предназначена для вычисления

температурного поля объекта в масштабе реального времени и передачи результатов в СПД-Т.

Разработанная модель имеет следующие особенности:

- соответствует стандарту МЭК 61131-3, работает на различных платформах – от микроконтроллеров до серверов в облаке, в том числе в виде виртуального ПЛК в среде ОС Linux;
  - выполняет трехмерный расчет поля температур с применением метода конечных разностей в цикле 60–80 мс;
  - рассчитывает средние, минимальные и максимальные температуры элементов с привязкой по координате и времени;
  - обеспечивает точность второго порядка по координате.
- В июле 2022 г. модель про-



Внешний вид силового трансформатора

демонстрирована представителям АО «Электрозавод», АО «РАСУ» и ООО «БО-Энерго», ведутся работы по верификации модели на испытательном стенде АО «Электрозавод». Данная разработка соответствует высоким стандартам РФЯЦ-ВНИИЭФ по научной проработке и технической реализации сложных комплексных задач, обеспечивающих надежность и конкурентоспособность разработок на уровне лучших мировых аналогов.

### СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ АСУ ТП ЭНЕРГОБЛОКОВ № 3 И № 4 АЭС «КУДАНКУЛАМ»

В 2022 г. на полигоне филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИ-ИС им. Ю.Е. Седакова» был успешно проведен первый этап предварительных автономных испытаний системы подготовки данных (СПД) для автоматизированного внесения изменений в прикладное программное обеспечение и эксплуатационную документацию систем верхнего блочного уровня, системы верхнего станционного уровня, систем регистрации важных параметров эксплуатации из состава АСУ ТП энергоблоков № 3 и № 4 АЭС «Куданкулам».

Целью создания СПД является предоставление возможности изменения прикладного программного обеспечения (ППО) и работы с архивами сигналов систем верхнего уровня без привлечения специалистов – разработчиков ППО, находящихся на территории России. СПД позволяет автоматизированно изменять видеокадры, отображающиеся на рабочих станциях, алгоритмы формирования сигналов и перечни входных/выходных сигналов и данных. Также для удобства работы персонала, эксплуатирующего АЭС «Ку-

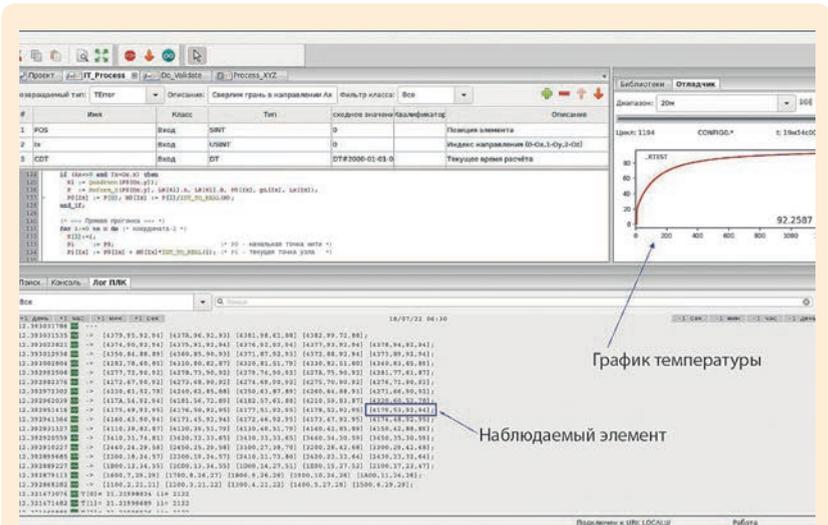


График температуры

Наблюдаемый элемент

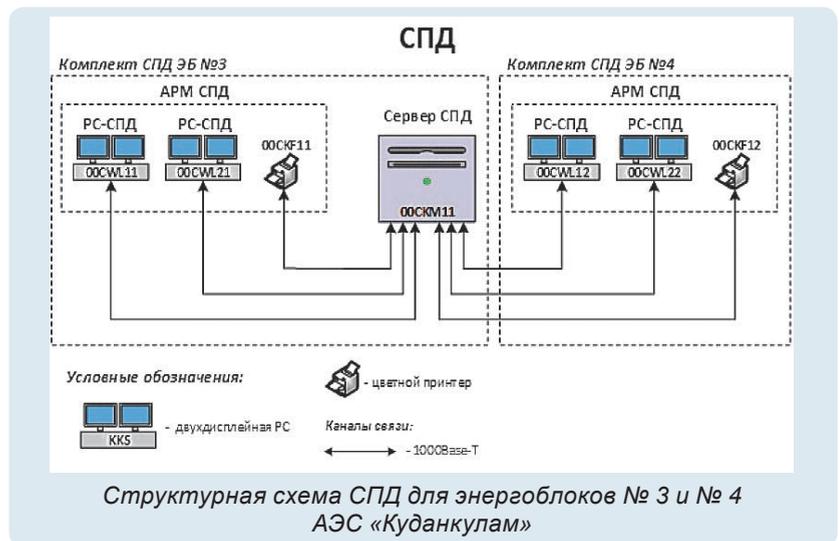
Моделирование тепловых процессов силового трансформатора

данкулам», СПД предоставляет возможность автоматического генерирования альбомов видеокладов, руководств оператора и пользователя, описания применения, массивов входных/выходных сигналов и т. д.

В ходе испытаний было подтверждено соответствие системы требованиям технического задания и проведен независимый аудит по верификации и валидации с представителями комитета IV&V ИКАЭЛ.

### РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ РАДИОЗАМЕТНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

В НИИИС им. Ю. Е. Седакова более 15 лет ведутся работы в области создания радиопоглощающих материалов. По данной тематике получено 6 патентов и подано 2 заявки на изобретение. В 2022 г. завершены работы по поиску путей снижения радиозаметности летящих объектов. Разработано и запатентовано новое техническое решение, включающее оригинальную конструкцию и способ изготовления таких изделий. Объекты содержат углепластиковый корпус со специальными свойствами и разрушаемую оболочку для взрывчатого вещества. Разработан не имеющий аналогов новый радиопоглощающий материал высокой плотности ( $6,5 \text{ г/см}^3$ ), способный заменить металлические (отражающие ЭМИ) элементы (оболочку) объектов и одновременно обеспечить низкий уровень отражения ЭМИ и необходимые поражающие качества осколков. Объекты, изготовленные по данной технологии, обладают уровнем отражения радиосигнала до 20 раз меньшим по сравнению с металлическими объектами в диапазоне частот 6,5–37,5 ГГц.



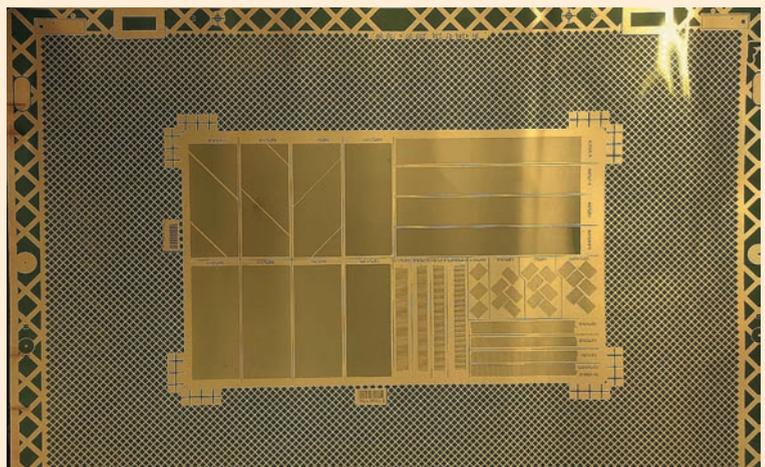
### ПРЯМОЕ ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Уровень развития технологий обеспечивает широкое применение многослойных печатных плат в качестве базовой конструктивной основы современных радиоэлектронных устройств цифровой и аналоговой обработки сигналов. Основная тенденция развития в этой области – увеличение скорости передачи и обработки информации в цифровых устройствах, которое ведет к повышению быстродействия и увеличению плотности проводящего рисунка печатных плат. Для решения указанных задач необходимо освоение

комплекса технологических процессов изготовления прецизионных печатных плат (6–7-й класс точности).

Внедрена технология прямого экспонирования, позволяющая:

- полностью исключить изготовление фотошаблонов с присущими им усадками, наличием дефектов, износом и трудозатратами;
- получить минимальную ширину засвечиваемых линий 25 мкм с точностью  $\pm 2,5 \text{ мкм}$  и рассовмещение рисунков двустороннего слоя (платы) не хуже  $\pm 5 \text{ мкм}$ , что с необходимым запасом обеспечивает изготовление плат вплоть до 7-го класса точности;



Слой тестовой платы 6-го класса точности, полученный прямым экспонированием

– автоматизировать процесс экспонирования плат и слоев, исключив только процессы загрузки и выгрузки заготовок, осуществляемые вручную;

– увеличить габариты заготовок до 505×400 мм.

Максимальная производительность установки – до 240 сторон/ч – позволит изготавливать печатные платы серийно.

### АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СОЗДАНИЯ ОБЪЕДИНИ- ТЕЛЬНОЙ ПЛАТЫ АППАРАТНЫХ МОДУЛЕЙ С ЛИНИЯМИ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ СО СКОРОСТЬЮ 25 ГБИТ/С

Завершена работа по анализу вариантов создания объединительной платы аппаратных модулей системы межпроцессорных обменов (СМПО). В рамках работы исследованы характеристики (материалы, конструктивное исполнение, количество линий передач) объединительной платы с линиями передачи сигналов со скоростью 25 Гбит/с для определения реализуемости и целесообразности (с учетом доступных технологий) ее применения в отечественной коммуникационной системе – СМПО. Объединительная плата предназначена для замены части кабельных соединений со смежными адаптерными блоками внутри адаптерной сборки за счет организации связей высокоскоростных каналов, выполненных на печатной плате.

В ходе выполнения НИР исследованы варианты:

- трассировки дифференциальных пар последовательных интерфейсов передачи данных со скоростью 25 Гбит/с;

- размещения высокочастотных разъемов и разъемов питания (мощностью 100 Вт каждый) на плате;



Фрагмент рисунка слоя тестовой платы с шириной проводника 75 мкм

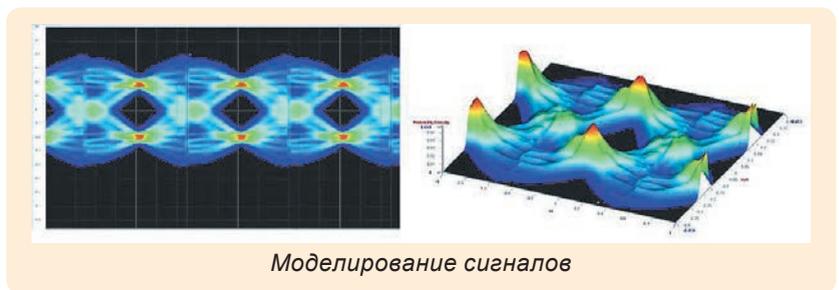
- конструкции платы с учетом окон для потока охлаждающего воздуха.

Спроектированы два варианта многослойных печатных плат с разным стеклом слоев, проведено моделирование высокоскоростных сигналов. Продемонстрирована возможность отказа от дорогостоящих

импортных материалов. Данная разработка печатного узла, обеспечивающая качественное прохождение сигналов со скоростью 25 Гбит/с и спроектированная с учетом обеспечения возможности ее изготовления на мощностях института, станет уникальной российской разработкой.



Спроектированная многослойная печатная плата



Моделирование сигналов

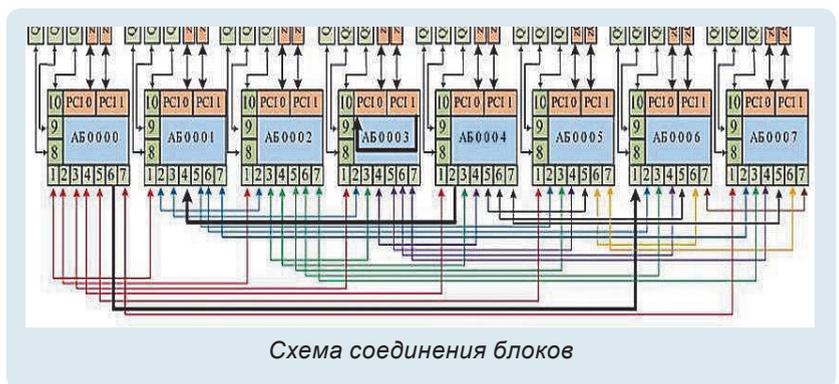


Схема соединения блоков

## ТЕХНОЛОГИЯ «ТОНКОГО КЛИЕНТА» «СИНЕРГИЯ-ТК»

«Синергия-ТК» – программный модуль, работающий в сетях с терминальной архитектурой, который переносит все или большую часть задач по обработке и защите информации на сервер.

Серверная часть модуля «Синергия-ТК» предоставляет среду виртуализации для работы операционных систем и прикладных программ и управляется с помощью комплекса средств управления. На сервере установлены необходимые программы, хранятся данные и выполняются вычисления; это решает задачи консолидации вычислительных ресурсов в рамках многоуровневой защищенной информационной инфраструктуры.

Клиентская часть «Синергия-ТК» представляет собой прикладную программу, которая запускается на терминалах (физических автоматизированных рабочих местах) для решения конкретных задач пользователя.

В программном модуле «Синергия-ТК» реализован комплекс средств защиты, обеспечивающий возможность обработки информации ограниченного доступа, в том числе составляющей государственную тайну.

## КОМПЛЕКС ВИРТУАЛИЗАЦИИ «СИНЕРГИЯ-ГИПЕРВИЗОР»

Комплекс виртуализации «Синергия-Гипервизор» разрабатывается в рамках реализации проекта по созданию комплекса программ в защищенном исполнении «Система полного жизненного цикла изделий "Цифровое предприятие"».

«Синергия-Гипервизор» является движущей силой концепции виртуализации, позволяя физическому хост-компьютеру управлять не-



Схема реализации «Синергия-ТК»

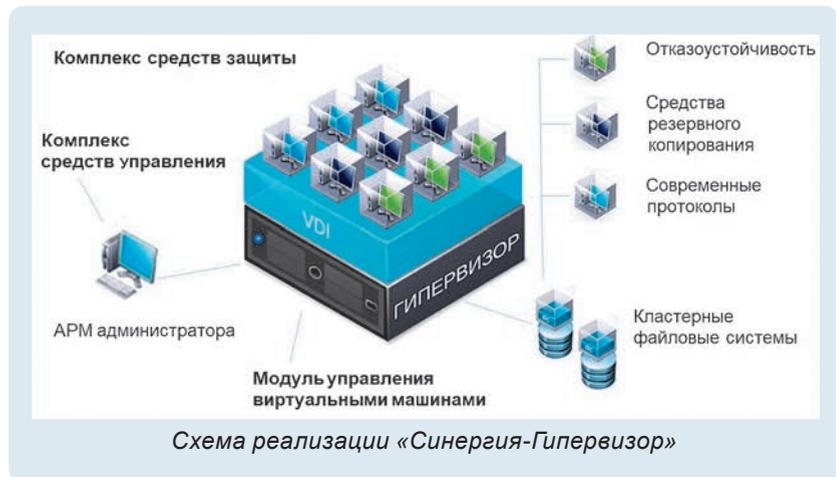


Схема реализации «Синергия-Гипервизор»

сколькими виртуальными компьютерами, что помогает максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы: память, пропускную способность сети и количество циклов процессора.

Комплекс виртуализации «Синергия-Гипервизор» эффективен для создания защищенных систем автоматизированных распределенных и облачных вычислений, что позволяет обрабатывать информацию ограниченного доступа, в том числе составляющую государственную тайну.

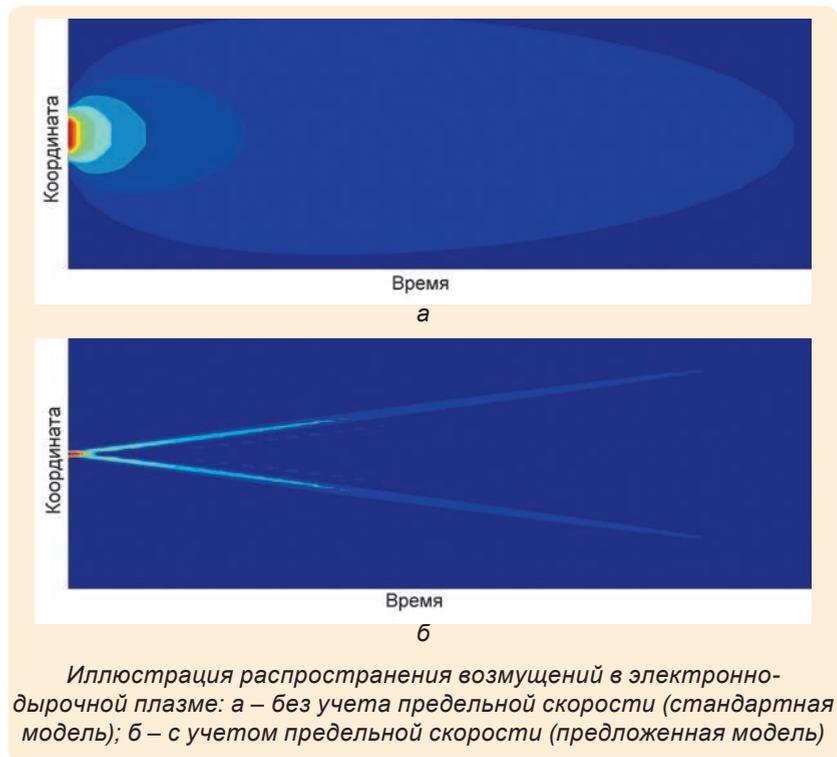
## НОВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Основной тенденцией развития микроэлектроники является уменьшение топологиче-

ских норм. Это улучшает функциональные характеристики интегральных схем, однако снижает сбоеустойчивость при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства и атмосферных нейтронов, что является критически важным для космических аппаратов и авиационной техники. Новые физические эффекты, проявляющиеся в элементах субмикронных интегральных схем, в частности баллистический перенос носителей заряда, приводят к росту погрешностей результатов моделирования переходных ионизационных процессов, необходимых для расчета сбоев и отказов изделий микроэлектроники при воздействии ионизирующих излучений. Поэтому актуальной задачей является разработка новых численных моделей переход-

ных ионизационных процессов в полупроводниковых структурах.

По тематике Национального центра физики и математики в НИИИС им. Ю. Е. Седакова разработана диффузионно-дрейфовая модель в локально-неравновесном приближении для анализа релаксации возбуждений в электронно-дырочной плазме при прохождении тяжелых заряженных частиц через чувствительный объем элементов интегральных схем, первичных атомов отдачи при воздействии нейтронных потоков или лазерного излучения пикосекундной длительности, имитирующего их. Предложенная модель имеет широкую область применимости для описания быстропотекающих релаксационных процессов, корректно учитывает баллистический предел скорости носителей заряда, что необходимо для расчета вероятности сбоев и отказов изделий микро- и нанoeлектроники при воздействии ионизирующих излучений.



*Иллюстрация распространения возмущений в электронно-дырочной плазме: а – без учета предельной скорости (стандартная модель); б – с учетом предельной скорости (предложенная модель)*

На рисунках показано распространение возмущений в электронно-дырочной плазме без учета предельной скорости (стандартная модель) и с ее учетом (предложенная модель). Скорость распространения возмущения постоянна на иллюстрации пред-

ложенной модели и стремится к бесконечности в начальный момент времени, что нефизично и демонстрирует недостаточную точность на иллюстрации стандартной модели.

# 2022