

## 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.

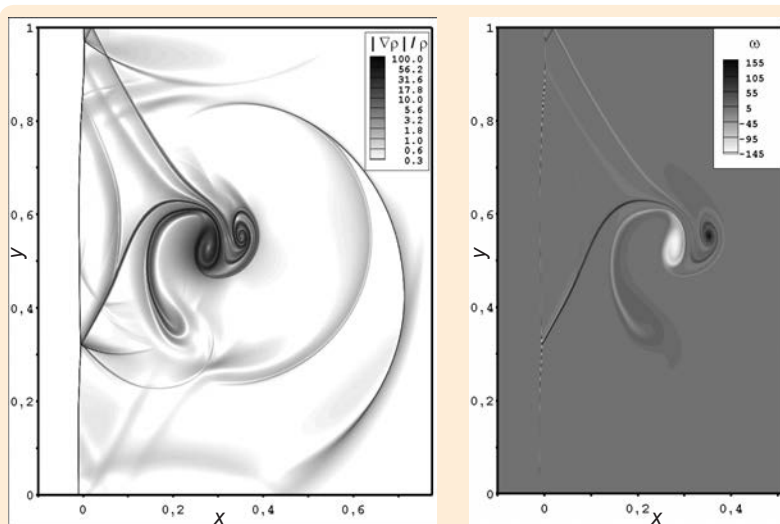
Среди множества приложений вихреразрешающих подходов выделяется класс задач, в которых турбулентный поток взаимодействует с ударной волной, при решении которых исследователи сталкиваются с дилеммой: с одной стороны, численные методы, рассчитывающие такие течения, должны обладать надлежащей диссипацией, 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 шестигранными ячейками.

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

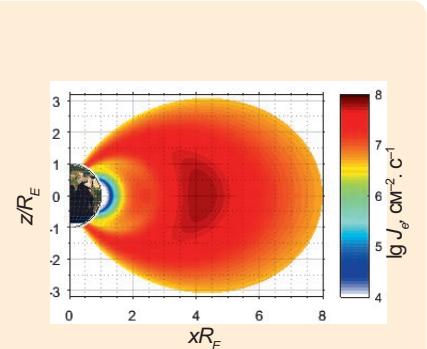
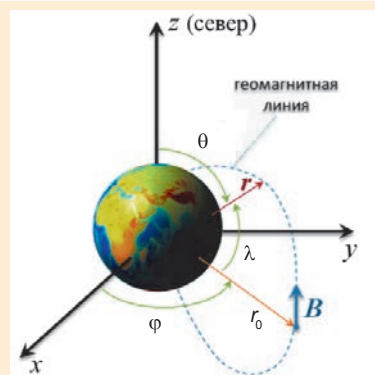
В результате тестовых расчетов установлено, что разработанный численный метод по точности и времени расчета решения трехмерного уравнения лучистой теплопроводности на структурированной непрямоугольной сетке, состоящей из произвольных шестигранников с линейчатыми гранями, дает удовлетворительные результаты.

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 (кеплерового) 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

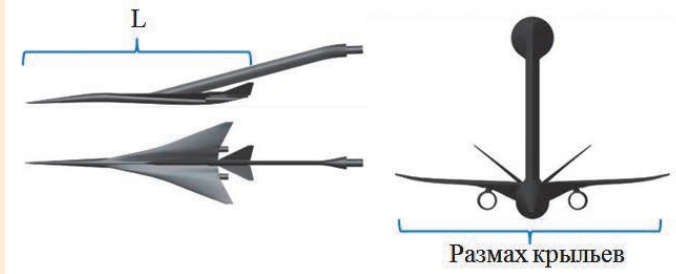
сеток выполняется расчет рассматриваемой задачи, начиная с самой грубой сетки в последовательности. По завершении расчета полученное решение интерполируется на более подробную сетку и используется как начальная инициализация для расчета на ней.

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).

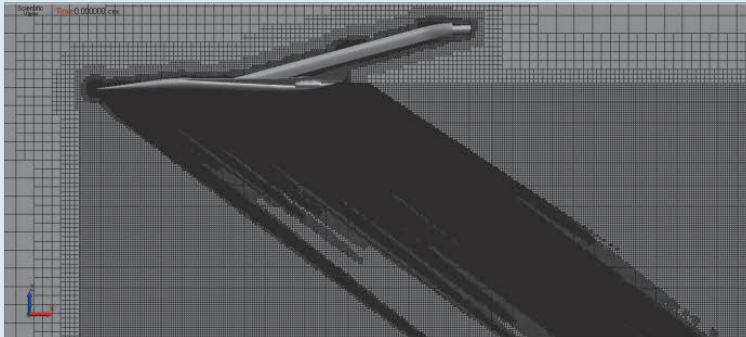
Результаты применения предложенных методов были продемонстрированы на задачах сверхзвуковой аэродинамики: расчет интенсивности головной ударной волны на заданном расстоянии под осесимметричным телом Seeb-ALR и расчет сверхзвукового обтекания модели летательного аппарата Lockheed Martin 1021 (LM1021).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

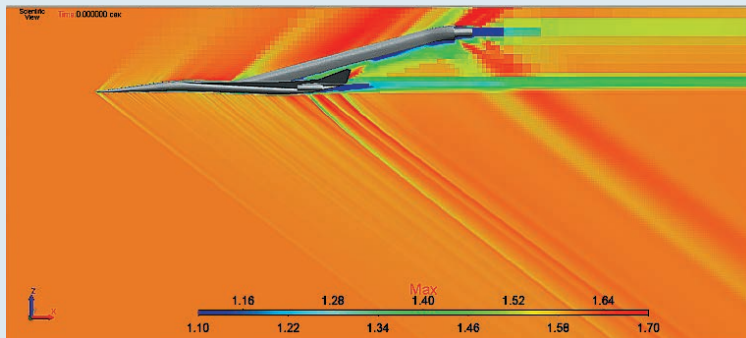




Геометрия исследуемого объекта

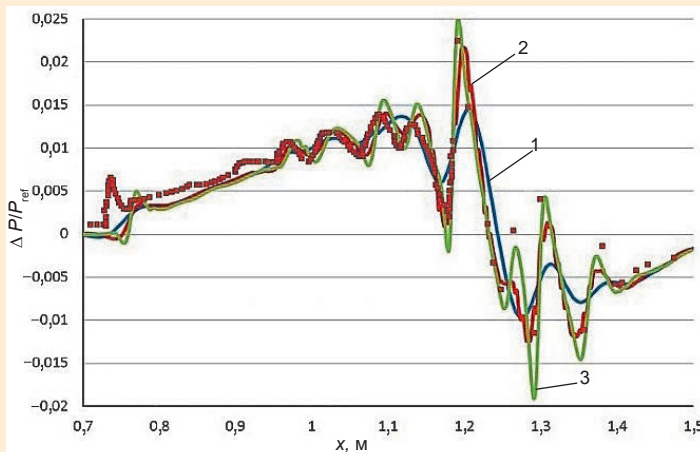


а



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.

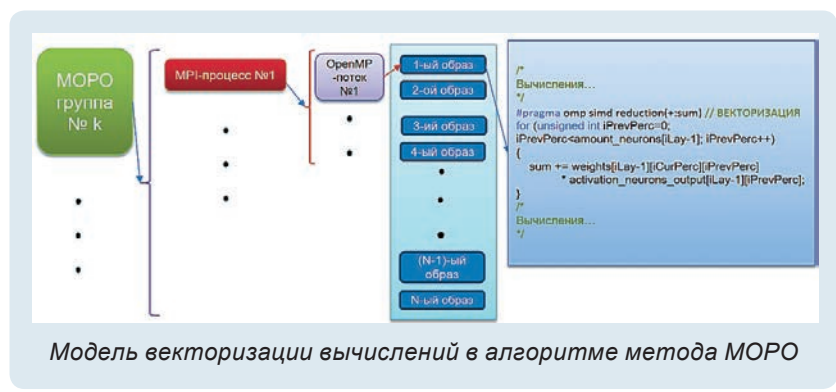
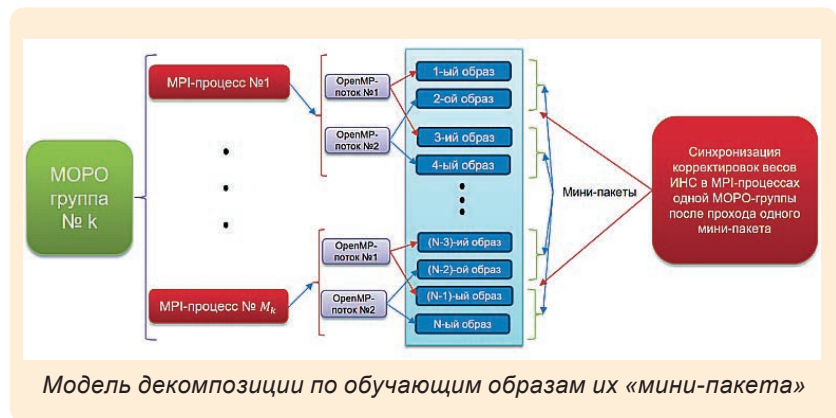
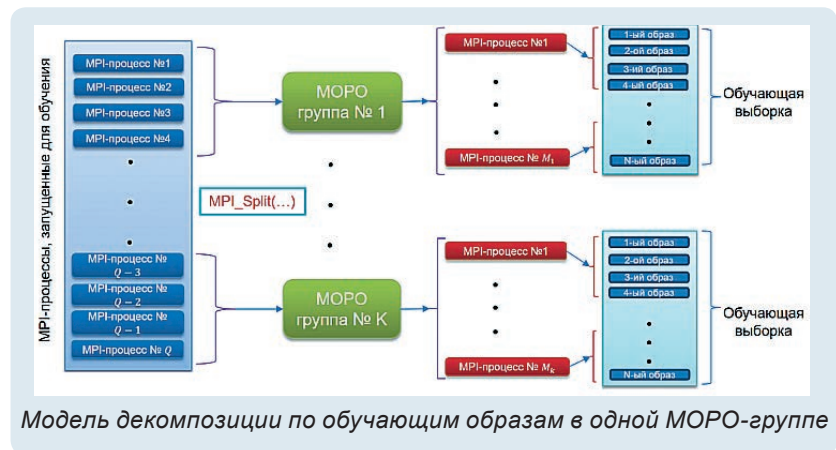
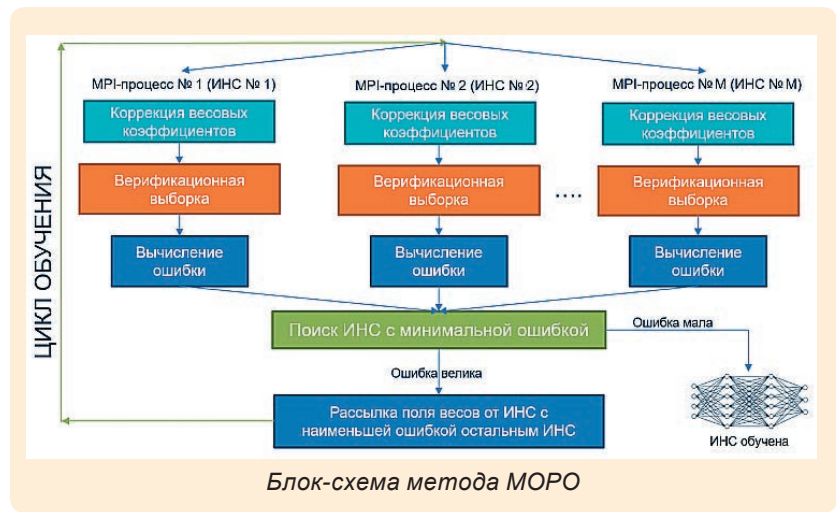
На примере представленной задачи показано, что в обоих случаях за счет применения многосеточного геометрического метода для начальной инициализации было достигнуто ускорение сходимости численного решения, а за счет построения локального измельчения в области фронта ударной волны (средствами статической 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`-потокками. 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.

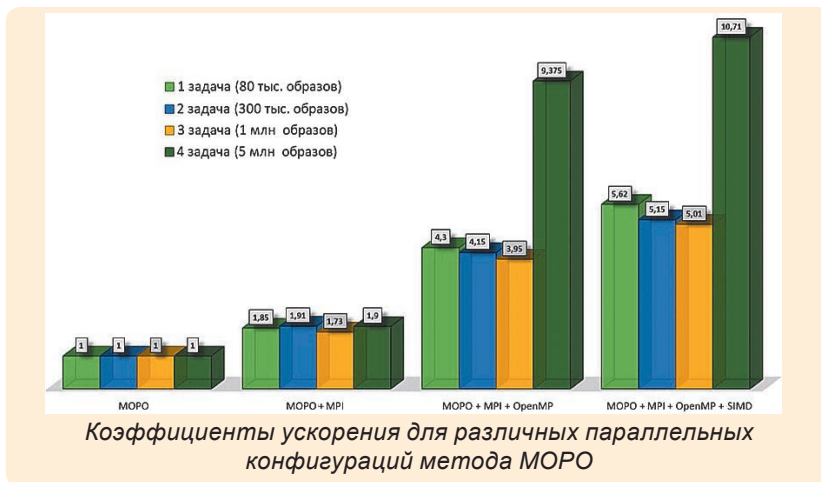
На диаграмме представлены коэффициенты ускорения для различных параллельных конфигураций метода МОРО для одной эпохи обучения. В процессе проведения тестов были выбраны следующие наиболее оптимальные конфигурации запуска:

- 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

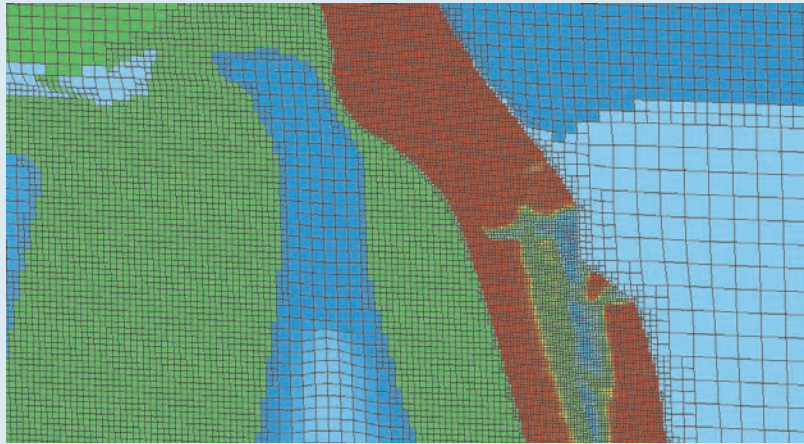
с адаптацией сетки под решение задачи без остановки расчета и вмешательства пользователя.

Алгоритм построения адаптированной под решение сетки содержит несколько основных этапов:

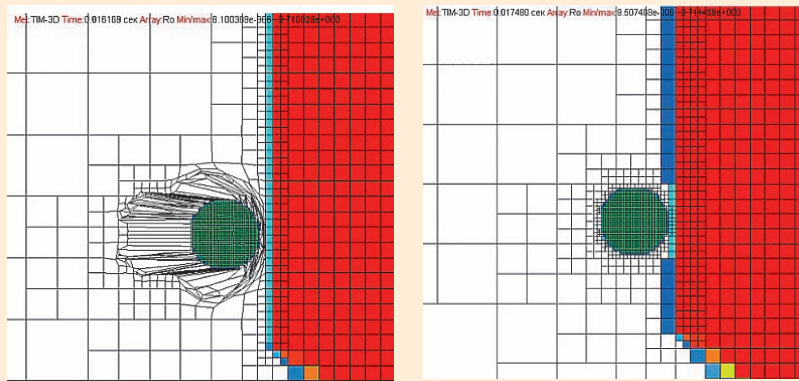
- прерывание счета задачи и подготовка данных для передачи в блок генерации сетки;
- формирование габаритов сетки и набора габаритов исходных ячеек;
- формирование дробно-адаптивного шаблона на основе данных от исходной сетки с учетом локальной детализации ячеек по веществам;
- конвертация шаблона в 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-

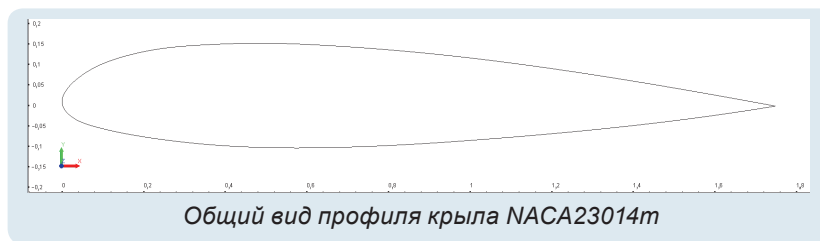
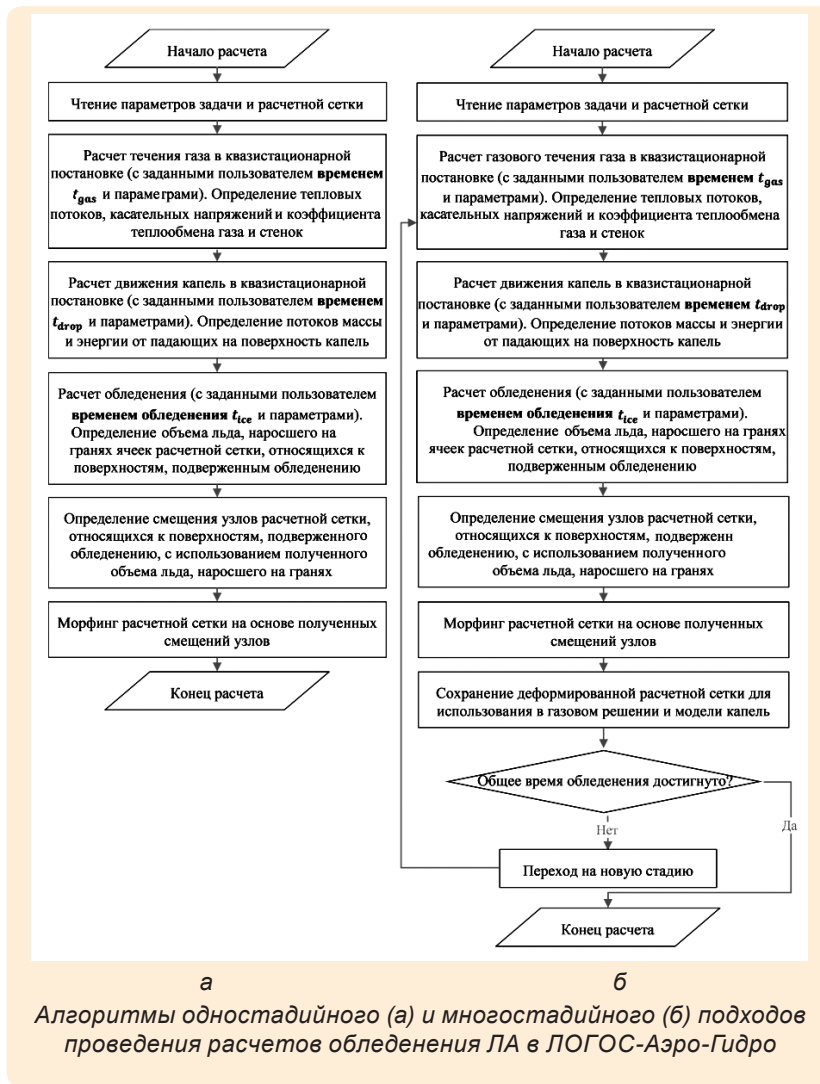
ний РАН» (Москва) предложили свой подход к решению задач обледенения летательных аппаратов (ЛА) и продемонстрировали его на примере решения некоторых задач с помощью модуля ЛОГОС-Аэро-Гидро.

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.

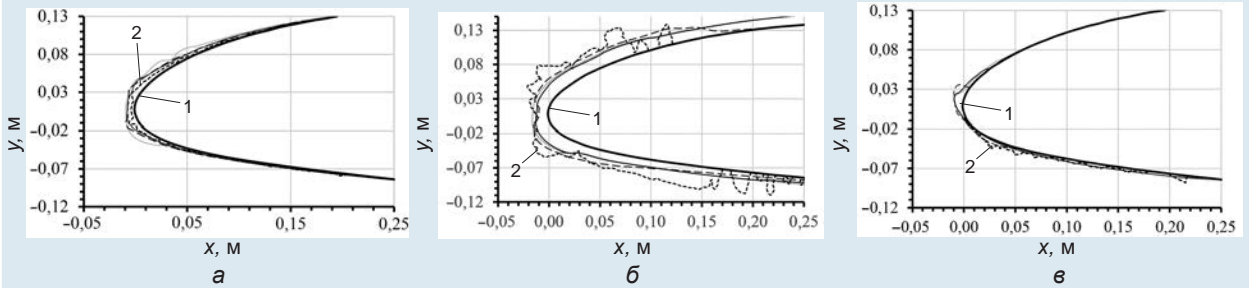
Основное отличие этих подходов заключается в учете влияния изменения формы ледяного нароста на аэродинамические характеристики ЛА и определении величины теплового потока на поверхности, подверженной обледенению. При одностадийном подходе расчет всех этапов проводится один раз. Достоинство данного подхода 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 NASA23014t 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 Lewice

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

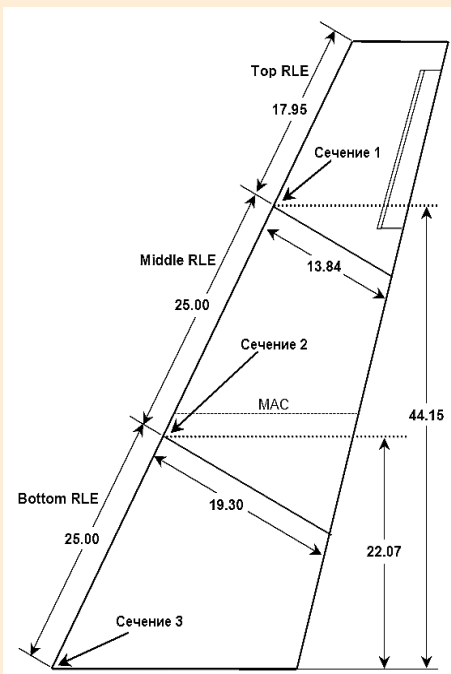
Результаты, полученные в ЛОГОС-Аэро-Гидро, вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и данными зарубежного ПО.

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

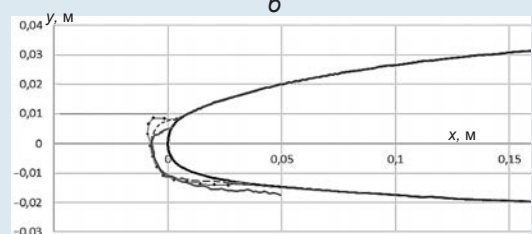
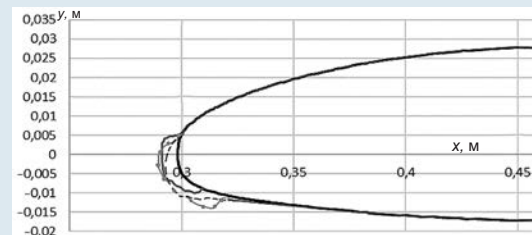
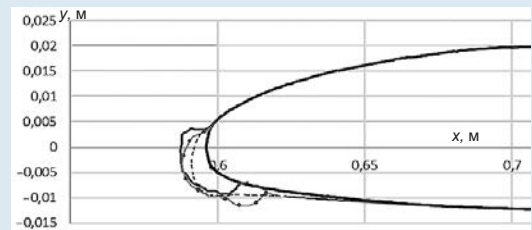
Расчет обледенения проводился при следующих парамет-

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,



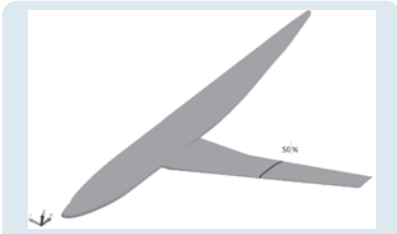
Общий вид крыла GLC-305 с характерными размерами (в дюймах)



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

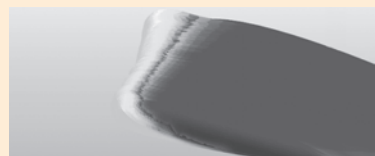
равным температуре торможения потока плюс 1 градус.

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



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

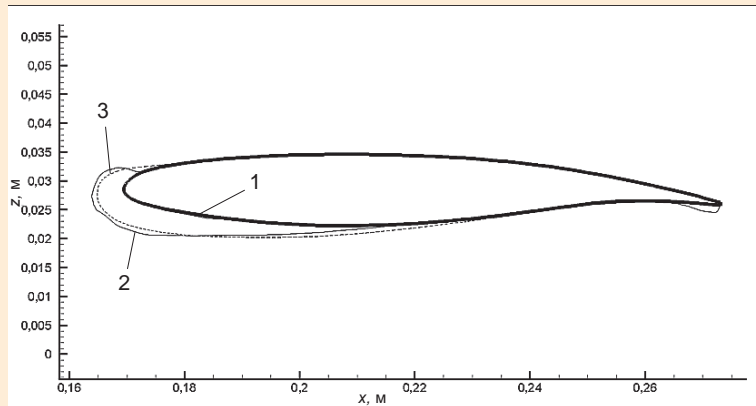
Расчет обледенения проводился при следующих параметрах набегающего потока: число Маха  $M = 0,235$ , давление  $P = 95060$  Па, угол атаки  $\alpha = 6^\circ$ ,  $LWC = 1$  г/м<sup>3</sup>,  $MVD = 20$  мкм, температура набегающего потока  $261,5$  К, время обледенения 3 минуты. Задача решалась с использованием 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).



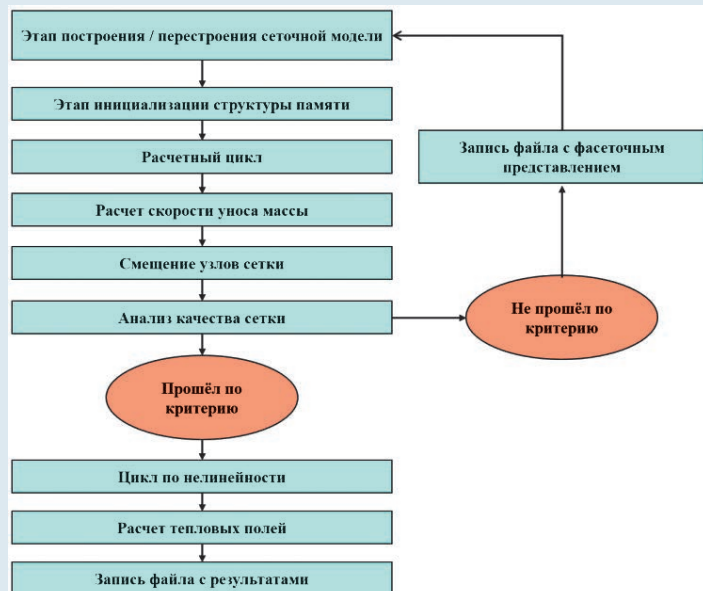
Визуализация обледенения модели DLR-F6, вид вдоль крыла

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

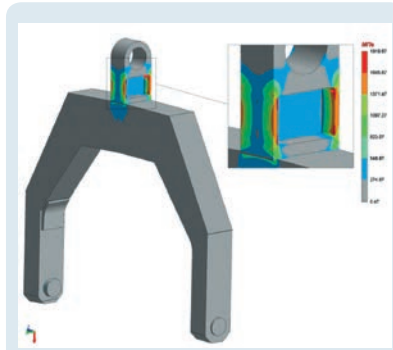
рассмотрен поэтапный алгоритм решения, включающий перестроение сеточной модели по достижении критерия останова и продолжение расчета.

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.

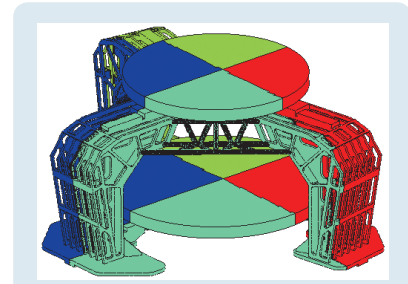
В 2022 г. продолжалась работа по развитию тиражируемого цифрового модуля ЛОГОС-Гидрогеология. Акцент



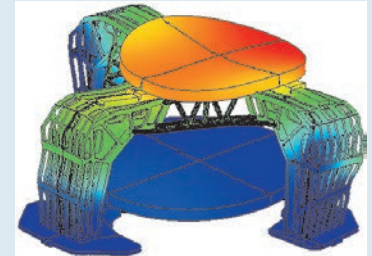
*Интенсивность напряжений в конструкции при действии нагрузок, соответствующих проектному землетрясению*

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.

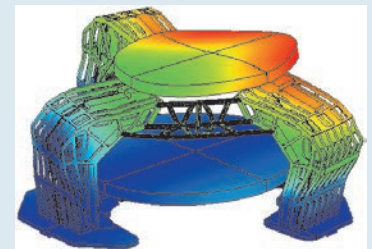
По итогам работ 2022 г. подготовлено техническое задание по расширению функционала цифрового продукта ЛОГОС-Гидрогеология в интересах решения задач горнодобывающих отраслей промышленности и частных и государственных недропользователей, региональных операторов ТКО и предприятий Госкорпорации «Росатом». 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.

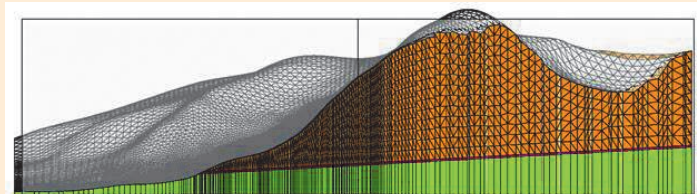
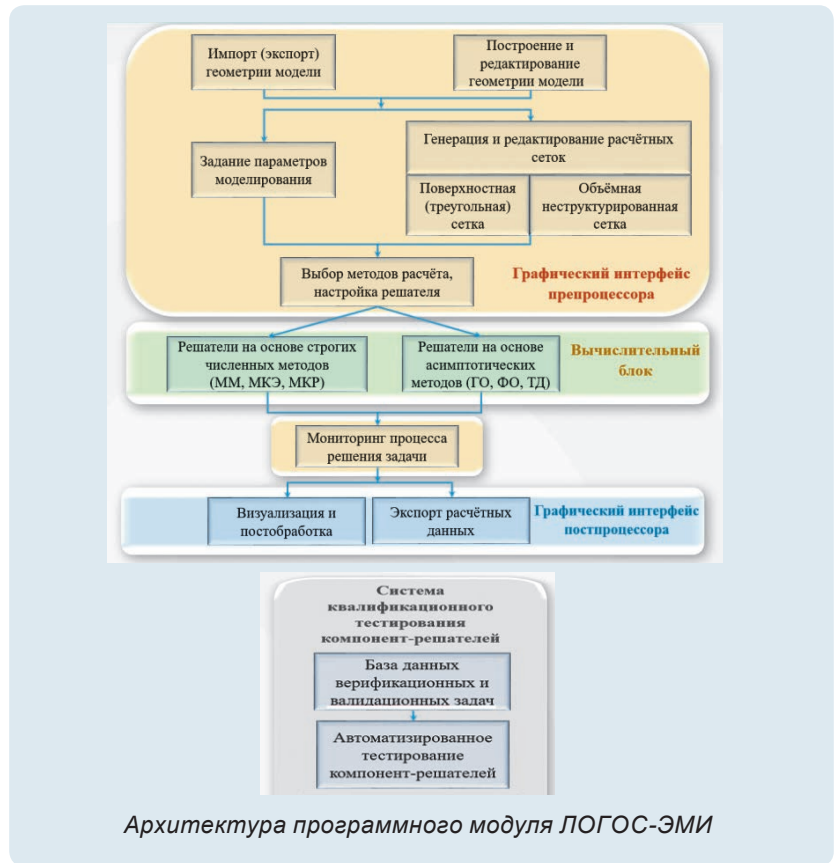
В 2022 г. в ходе работ по расширению функциональных возможностей цифрового продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС дальнейшее развитие получила версия создаваемого тиражируемого цифрового программного модуля ЛОГОС-ЭМИ для численного моделирования электромагнитных процессов 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:

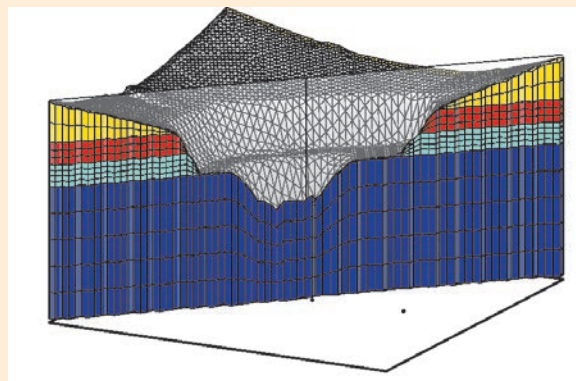
1) *метод моментов*, основанный на решении интегральных уравнений Максвелла для электрического и магнитного полей с использованием многоуровневых, мультипольных приближений для ускорения вычислений в заполненных, плохо обусловленных матрицах систем линейных алгебраических уравнений;

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

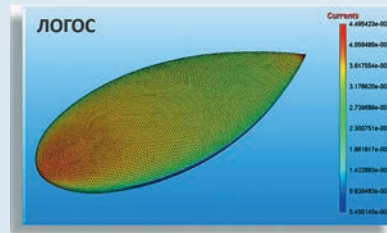
ЛОГОС-ЭМИ и использовались для расчета задач по определению ЭПР различных объектов из верификационного базиса.

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.

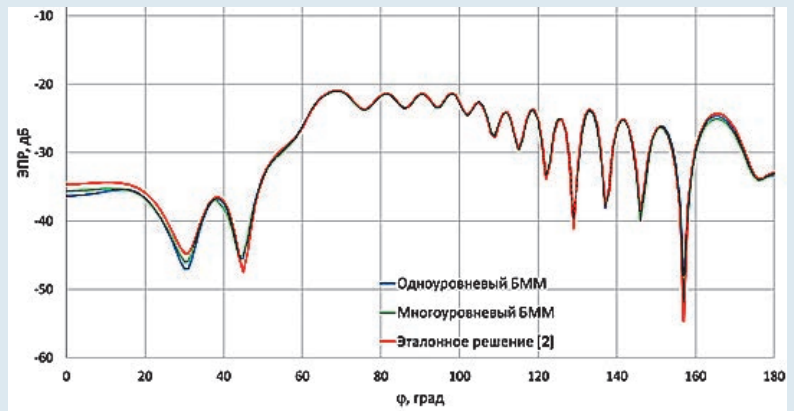
Разработан метод построения многогранных сеток, состоящих из ячеек произвольной формы, не имеющих ограничений по количеству узлов и граней. Предложенный метод был реализован в форме автоматического генератора неструктурированных объемных сеток из произвольных многогранников для трехмерного моделирования 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.

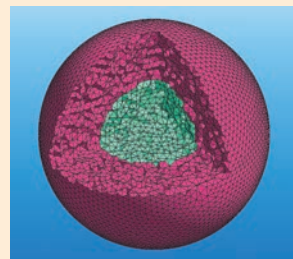


а

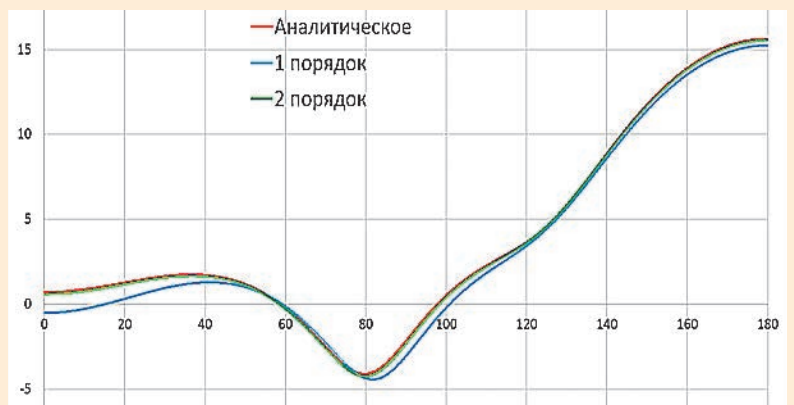


б

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

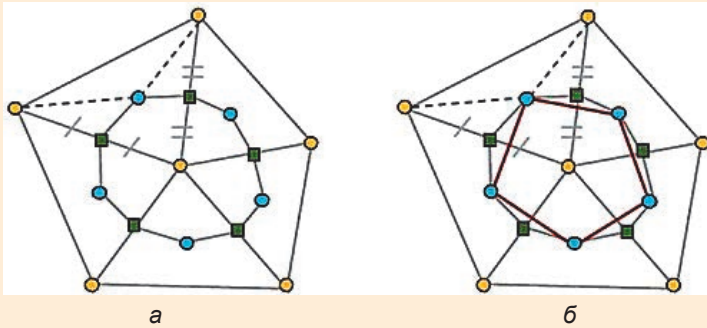


а



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

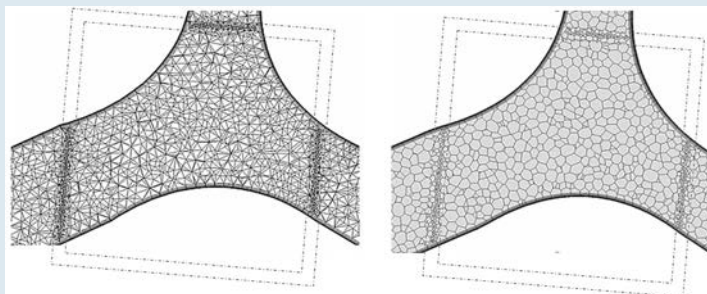
тело); локальный размер ребра на поверхности и внутри контрольной области.

Процесс генерации объемной неструктурированной многогранной сетки состоит из следующих этапов:

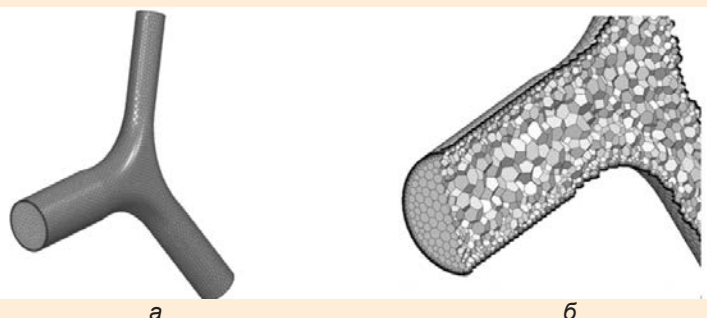
- построение первичной сетки  $G_{prim}$ ;
  - определение множества  $S$  характерных кривых – ломаных линий, проходящих по ребрам поверхностной сетки и описывающих особенности геометрической модели: линии стыковки границ, острые кромки и детали геометрии;
  - построение треугольной поверхностной сетки, 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-

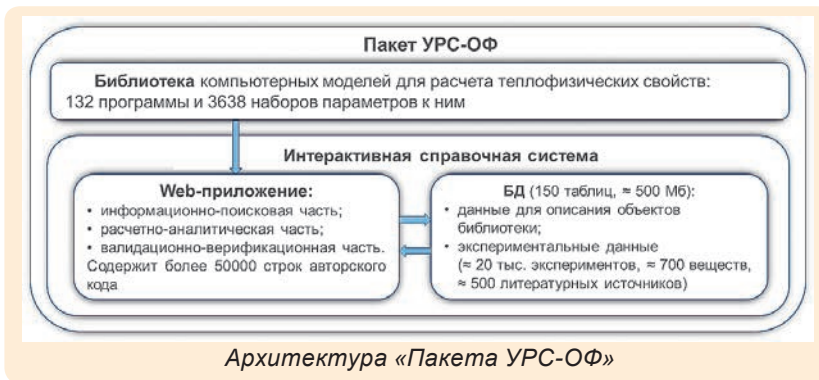


Сечение объемных сеток с локальным измельчением: а – первичная сетка, б – вторичная сетка



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 обдуманного 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	022814 (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 $\delta \rightarrow 0$ , $\nu_p \rightarrow \infty$ . 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 $\nu_p$ (при $\delta \neq 0$ ) приведено в [3].					
2. Стандартные значения энтропии взяты из справочника [4]. Имеется устаревшая версия U13F014, где $\nu_p \rightarrow \infty$ при $\delta \rightarrow 0$ .					
<b>Оценка времени счета уравнения состояния. (ссылка на документ)</b>					
Приняты следующие обозначения:					
$t_{\text{оп}}^{\text{УРС}} \sim t_{\text{оп}}^{\text{ИТТ}}$ – относительная оценка для области применимости УРС;					
$\Delta$ – диапазон значений $t_{\text{оп}}$ по областям, приняты 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	SE	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 нормировки	293	К
5	$P_0$		0,0001	ГПа
6	$E_0$		0	МДж/г
7	$\rho_{\text{нр}}$	Плотность нормировки $\rho_{\text{нр}}^0(0)$ и $\nu_p$	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

3 Система единиц  
3

4 Тип расчета  
проходит через точку на ударной адиабате  
Плотность: 5.990051E+000 г/см<sup>3</sup>  
энергия: 5.05326E+001 кДж/кг  
давление: 5.00200E+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

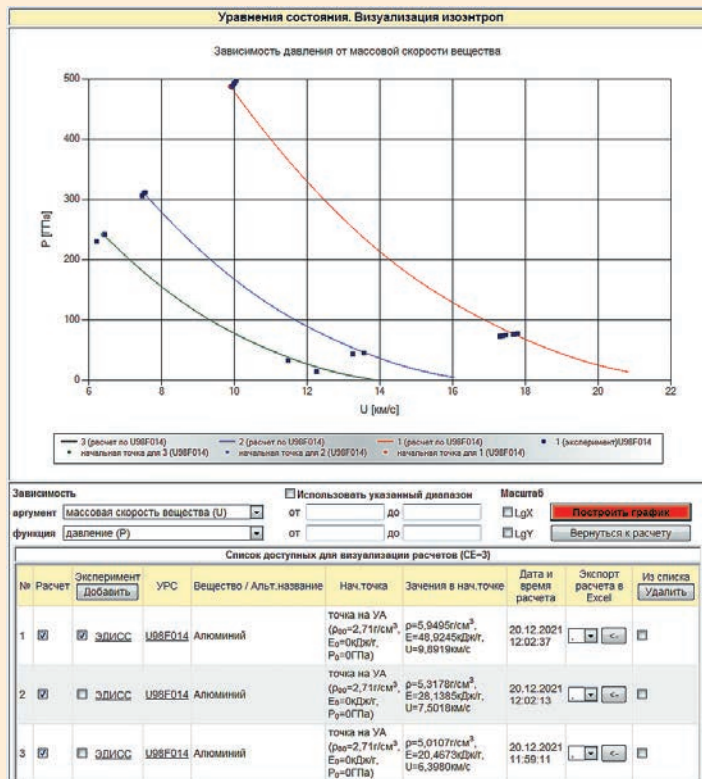
8  Расчет произведен. Результаты приведены ниже.

Визуализация результатов расчета

Точка на ударной адиабате							
№	$\rho$	$P$	$E$	$T$	$U$	$C_s$	КО
1	5.9901	5.0020E+02	5.0532E+01	2.9855E+04	1.8005E+01	1.4323E+01	0

Результат расчета по U98F014							
№	$\rho$	$P$	$E$	$T$	$U$	$C_s$	КО
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

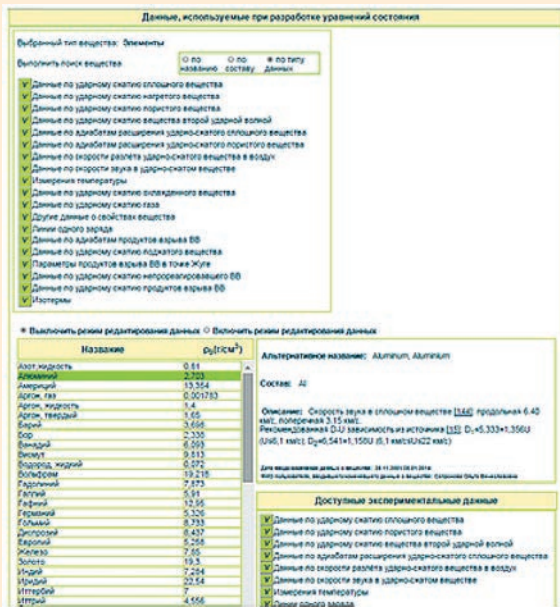
а



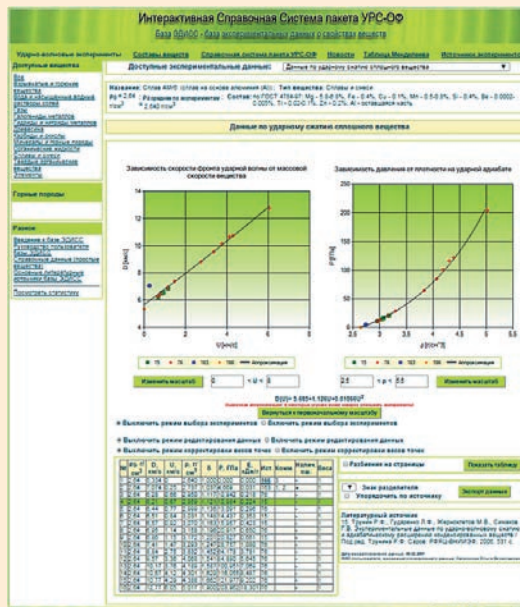
б

Интерфейс расчета (а) и визуализации изотроп по уравнениям состояния (б)





а



б

*Интерфейс раздела экспериментальных данных ИСС: поиск вещества по типу экспериментальных данных (а) и пример отображения данных для выбранного типа (б)*

В 2022 г. продолжались работы по развитию программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер», предназначенного:

– для многомасштабного многоуровневого математического моделирования физических процессов в аддитивных технологиях (технология селективного лазерного плавления и прямого лазерного выращивания);

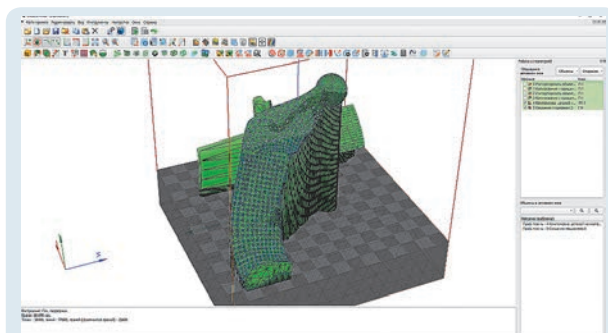
– для расчетно-экспериментального выбора оптимальных параметров работы оборудования для изготовления материалов и изделий из них с заданным уровнем свойств на основе математического моделирования;

– для проектирования новых изделий с улучшенными массовыми характеристиками при сохранении эксплуатационных свойств посредством топологической оптимизации (бионический дизайн) и использования решетчатых структур;

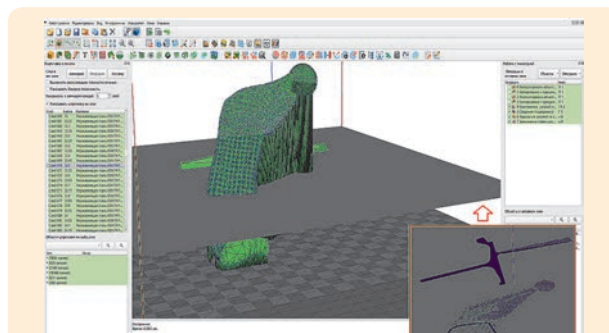
– для предпечатной подготовки деталей, изготавливаемых с помощью лазерных аддитивных технологий.

Разработана и выпущена первая версия программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер». Программный комплекс поддерживает линейку отечественных аддитивных машин MeltMaster (производи-

тель ОАО «НПО «ЦНИИТмаш») и аналогичных. К разработке ряда модулей для математического моделирования и проведению экспериментальных работ были привлечены ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», ООО «Кинтех Лаб», АНОО ВО «Сколтех», ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ». Реализованное в программном комплексе математическое моделирование позволяет предсказать результат печати деталей и уровень их механических свойств, скомпенсировать коробление изготавливаемых деталей, вы-



*Результат выполнения операций «компоновка деталей на платформе и задание настроек», «генерация поддержек»*



*Результат выполнения операций «нарезание деталей на слои (слийсинг)», «заполнение слоев штриховкой (хэтчинг)»*



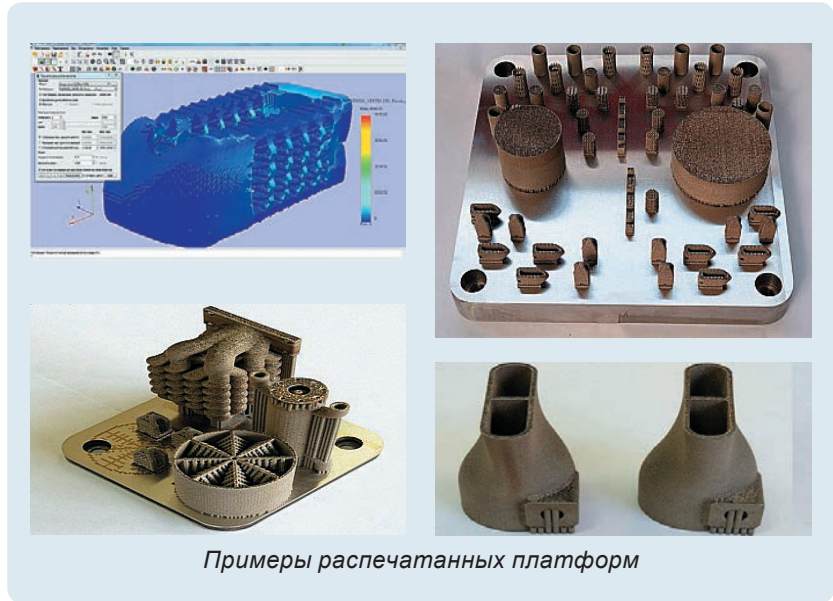
брать априори оптимальные режимы работы оборудования, исследовать процессы, происходящие в ванне расплава при формировании отдельных треков, рассчитать зеренную и первичную микроструктуру полученного материала.

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.