





70 лет

Институту прикладной математики

им. М. В. Келдыша

Российской академии наук

70 лет тому назад, в 1953 году, был основан наш Институт, Институт прикладной математики.

Организатором Института и его первым директором стал выдающийся ученый, математик и механик, президент Академии наук СССР (1961–1975 гг.), академик Мстислав Всеволодович Келдыш.

В нашей стране Институт стал пионером в области математического моделирования на ЭВМ различных задач науки, техники, технологии. Здесь были установлены и успешно работали одни из первых экземпляров практически всех отечественных ЭВМ, разрабатывалось их программное обеспечение.

В разные периоды своей 70-летней истории Институт активно сотрудничал с научными коллективами, которые возглавляли такие выдающиеся ученые и конструкторы как И. В. Курчатов, С. П. Королев, Ю. Б. Харитон, А. Д. Сахаров, А. П. Александров, С. А. Лебедев, Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, В. П. Глушко, П. О. Сухой.


Сегодняшний день Института — это работы по теоретической и прикладной математике, космосу, управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы, аэродинамике и небесной механике, астрофизике, суперкомпьютерам и искусственному интеллекту, робототехнике, математической биологии и биоинформатике.

В Институте работали и работают крупные ученые. Полученные ими научные результаты, высоко оцененные специалистами в нашей стране и за рубежом, стали классическими и вошли в учебники.

В Институте совместно трудятся как ветераны, пришедшие на работу несколько десятков лет тому назад, так и молодежь, связавшая свою судьбу с наукой.

В продолжение славных традиций Институт готов к выполнению задач, поставленных страной для обеспечения научного и технологического прогресса.

Директор ИПМ им. М. В. Келдыша РАН,
член-корреспондент РАН



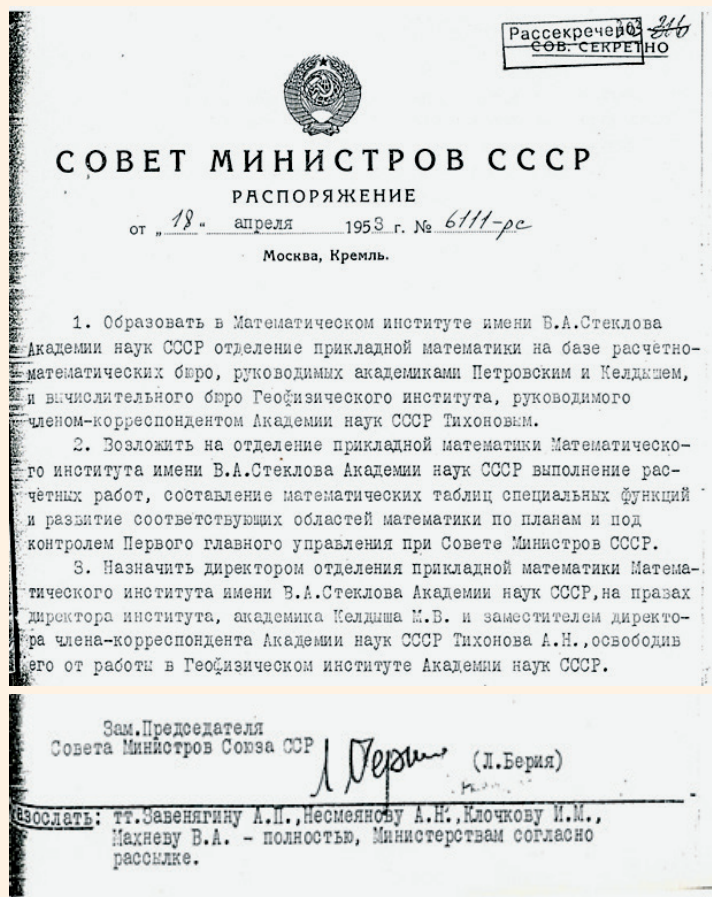
/А. И. Аптекарев/



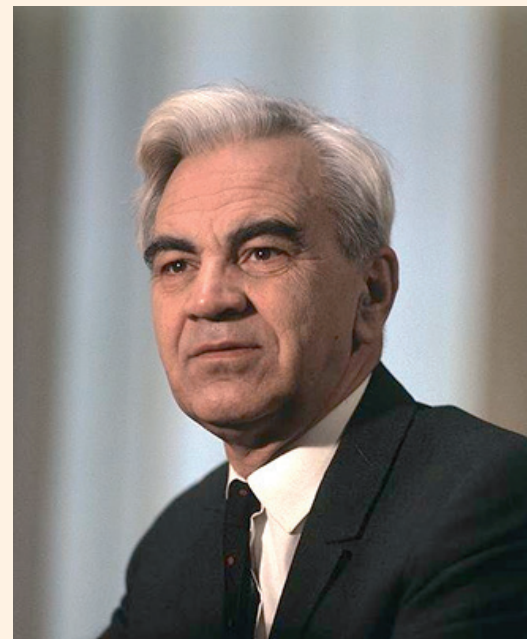
СОЗДАНИЕ И СТАНОВЛЕНИЕ ИНСТИТУТА

В начале работ по ядерной и ракетной программам стало понятно, что сложность, новизна и специфика возникших научно-конструкторских задач не позволяют решить их с помощью существовавших тогда методов, основанных на интуиции, оценках и прикидках, постепенной доводке конструкций до кондиции. Нужна была новая научная методология, опирающаяся на прямой математический расчет, которая обеспечивала бы детальное понимание физики явления, надежное прогнозирование поведения создаваемой конструкции, возможность ее оптимизации. Эта новая методология должна была объединить достижения как в фундаментальной, так и в прикладной математике.

В рамках Атомного проекта существовало несколько групп, занимающихся математическими расчетами (М. В. Келдыш, С. Л. Соболев, А. Н. Тихонов, К. А. Семендяев, Н. Н. Мейман и др.). Объединение «всех, кто умел считать» стало объективной предпосылкой для создания Института прикладной математики, решение о котором было принято Постановлением ЦК и Совета Министров СССР и Распоряжением Президиума АН СССР в апреле 1953 года. Название Института тогда звучало так: Отделение прикладной математики Математического института им. В. А. Стеклова Академии наук СССР. Направление его деятельности в 50–60-х годах было определено как решение с помощью математических методов задач, связанных с совершенствованием ядерного и термоядерного оружия и средств его доставки.



Организатором и директором Института стал Мстислав Всеволодович Келдыш. Несмотря на молодость (тогда ему было всего сорок два года), это был авторитетнейший ученый, действительный член Академии наук СССР, работавший в ЦАГИ, Математическом институте им. В. А. Стеклова АН СССР, Московском университете. Его перу принадлежал большой цикл блестящих работ по различным разделам математики и механики. Его имя было связано с успешным решением на основе глубоких теоретических разработок сложнейших технических проблем авиации 30–40-х годов. Поэтому неслучайно, когда физики обратились к директору Математического института Академии наук академику Ивану Матвеевичу Виноградову с просьбой порекомендовать им математика для работы над атомным проектом, он сразу назвал Мстислава Всеволодовича, сказав, что «Келдыш в любом приложении математики способен разобраться лучше всякого».



Семидесятилетняя история Института богата крупными научными событиями и достижениями. Здесь зародились и сформировались многие направления современной прикладной математики, механики, программирования. Как правило, они возникали при решении сложных научно-технических задач государственного масштаба. Проведенные расчеты в рамках работ по созданию ракетно-ядерного щита заложили основы современной прикладной математики. Результаты, полученные в этих исследованиях, не только позволили найти конкретные инженерные решения, но и пополнили копилку фундаментальных знаний, которые легли в основу современных методов прикладной математики и информационных технологий.

Институт стал базовой организацией для создания математических отделов для ВНИИ экспериментальной физики (Саров) и ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина (Снежинск). Из ИПМ выделились в самостоятельные научные учреждения Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, Институт космических исследований РАН, тесное и плодотворное сотрудничество с которыми продолжается и в настоящее время.

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М. В. КЕЛДЫША РАН В XXI ВЕКЕ

В настоящее время в Институте сложились и успешно развиваются следующие важные научные направления:

- Теоретическая и прикладная математика. Создание теоретико-математических и алгоритмических основ решения математических задач, требующих больших вычислительных ресурсов;
- Высокопроизводительные вычисления, информатика и программирование. Создание методов и средств разработки и сопровождения прикладного программного обеспечения на современных и перспективных суперкомпьютерах. Большие данные и искусственный интеллект;
- Математическое моделирование. Создание моделей, методов и средств для расчета параметров сложных технических систем и физико-химических процессов;
- Космические исследования. Создание методов и средств решения задач небесной механики, астродинамики и баллистико-навигационного обеспечения полетов космических аппаратов;
- Мехатроника. Создание методов и средств решения задач робототехники;
- Математические проблемы биологии. Создание методов и средств математического моделирования биологических явлений и систем.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

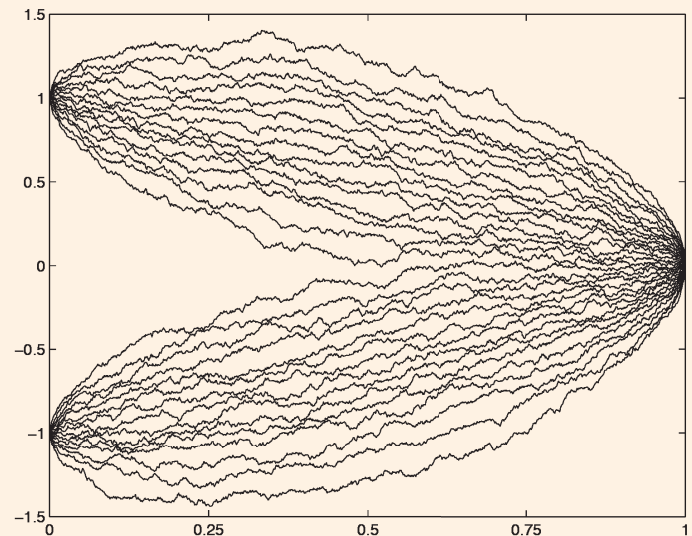
Работа над конкретными прикладными проектами ставит фундаментальные задачи в различных областях теоретической математики и механики. Последние два десятилетия решение этих задач велось по следующим направлениям:

- Вероятностные методы в работе с данными больших размерностей и больших размеров
- Общая теория дифференциальных и конечно-разностных уравнений
- Специальные функции, теория аппроксимаций, комплексный и асимптотический анализ
- Дискретная математика
- Динамические системы и задачи теоретической механики

Для массивов большой размерности разработана методика исследования пространства параметров для постановки и решения многокритериальных прикладных задач оптимизации. Речь идет о влиянии случайных погрешностей на вычисление показателей чувствительности. Доказано, что погрешность аппроксимации функции, вызванная «замораживанием» группы переменных, определяется глобальным показателем чувствительности для этой группы. Эти результаты помогают распараллеливать некоторые вычислительные алгоритмы.

Для случайных матриц больших размеров получены предельные распределения их собственных значений. В частности, такие распределения найдены для матриц с фиксированными собственными значениями, после возмущения их элементов гауссовскими случайными величинами. Это позволило решить задачу о броуновских мостах.

В теории обыкновенных дифференциальных уравнений на основе степенной геометрии разработаны общие алгоритмы, позволяющие



вычислять асимптотики решений, а также локальные асимптотические разложения решений существенно нелинейных и сингулярных уравнений. В отличие от алгебраических кривых, имеющих обычно разложения по дробным степеням, для дифференциальных уравнений типичными являются степенно-логарифмические разложения.

В теории уравнений в частных производных основной упор делался на уравнениях математической физики, лежащих в основе прикладных работ Института: кинетических уравнений, уравнений газовой и гидродинамики и многих других эллиптических, параболических и гиперболических уравнений и систем. Выделим лишь несколько фундаментальных продвижений.

Создание теории уравнений Барнеттовского приближения уравнения Больцмана, в том числе изучение устойчивости стационарных решений и выделение моделей, которые такую устойчивость гарантируют.

Доказательство существования и единственности сильного решения гиперболизованной 2-мерной системы Навье–Стокса и получение соответствующей диссипативной оценки, гарантирующей сходимости решения при стремлении параметра гиперболизации к нулю. Этот результат — серьезный аргумент в валидации использования гиперболизации при измельчении сеток в суперкомпьютерных вычислениях.

Дискретная математика на протяжении всей истории Института была важным направлением, обеспечивающим развитие информационных технологий, программирования и схемотехники. В последние два десятилетия здесь обозначилась передача лидерства молодым исследователям. Среди основных результатов этого периода выделим следующие:

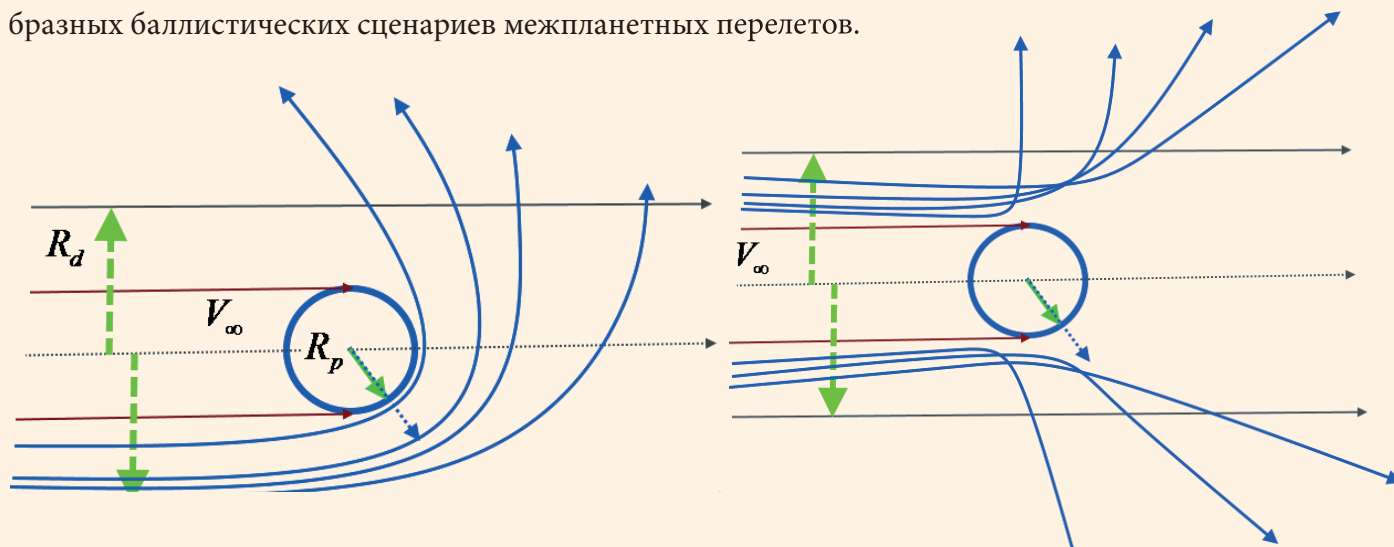
Построение контрпримера к считавшейся ранее эквивалентности между понятиями глубины и задержки схем: предъявлена бесконечная последовательность булевых функций, такая, что всякая минимальная схема для любой функции из этой последовательности имеет задержку и глубину, удовлетворяющие строгому неравенству.

Полностью описаны замкнутые классы распределений для систем преобразований бернуллиевских случайных величин булевыми функциями.

Тематика «Динамические системы и задачи теоретической механики» — одна из системообразующих разработок в фундаменте баллистического центра ИПМ им. М. В. Келдыша и института в целом.

Отмечая основные достижения XXI века, необходимо отметить принципиально новые методы управления гравитационными маневрами, являющимися результатом целенаправленного использования часто встречающегося в масштабах Вселенной феномена естественного гравитационного рассеивания.

Удалось получить обобщение формулы Резерфорда, учитывающее специфику рассеивающего воздействия пролетной планеты на траекторию КА. Также появляется возможность создания целенаправленного пучка траекторий после гравитационного маневра. В итоге существенно повышается вероятность попадания в сферу действия планеты назначения после совершения гравитационного маневра хотя бы одной пролетной траектории из ограниченного числа виртуальных прототипов. Существенно повышены эффективность и быстродействие рекуррентной процедуры поиска разнообразных баллистических сценариев межпланетных перелетов.



В области теоретической механики также решена задача о брахистохроне при действии сухого и вязкого линейного трения. С этой целью она представлена как задача о выборе оптимальной по быстродействию нормальной составляющей (управление) реакции опорной кривой, форма которой подлежит определению. Применен метод Охоцимского–Понтрягина исследования дифференциала функционала.

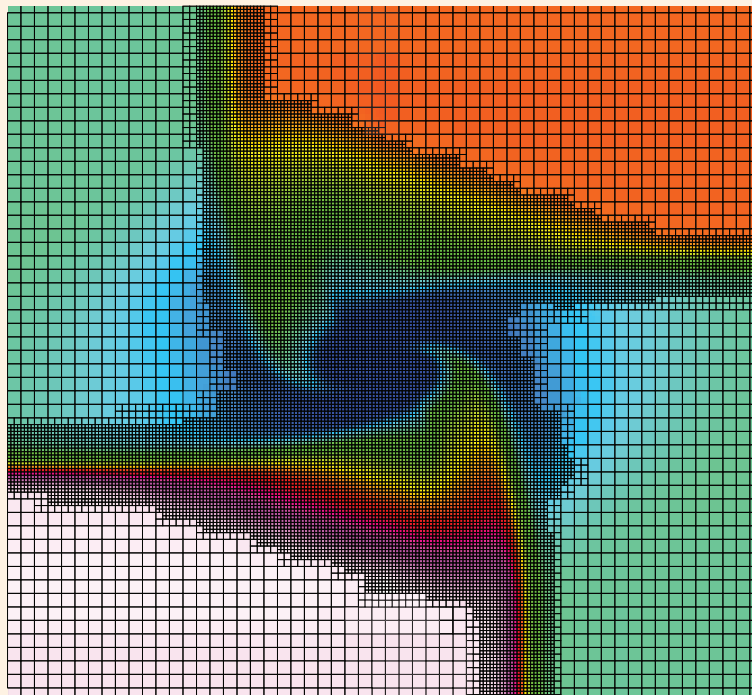
ПРИКЛАДНАЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА

Прикладная и вычислительная математика в ИПМ имеет славную историю. В нашем институте были заложены основы теории и применения разностных схем (А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, И. М. Гельфанд, С. К. Годунов) — главного базиса современного математического моделирования.

Созданное в первый период существования Института направление отечественной прикладной и вычислительной математики стало тем фундаментом, на который опирались успехи коллектива ИПМ им. М. В. Келдыша РАН в реализации поставленных перед ними государственных задач.

В последующие годы в Институте также постоянно поддерживались усилия на развитие прикладной и вычислительной математики, которые должны адекватно соответствовать развитию вычислительной техники и позволять решать все более сложные с алгоритмической точки зрения задачи.

Были предложены кинетические схемы, в своем построении учитывающие связь между кинетическим и газодинамическим описанием сплошной среды, предложен принцип гиперболизации, позволяющий значительно улучшить условие устойчивости явных схем. Эти алгоритмы хорошо адаптируются к архитектуре вычислительных систем с экстремально параллелизмом, сочетая качества эффективности и логической простоты, что определило в значительной мере успех Института в развитии высокопроизводительных вычислений. В этом плане представляется неслучайным успех Института в математическом моделирова-



нии сложных задач с использованием гибридных, содержащих графические платы, вычислительных систем.

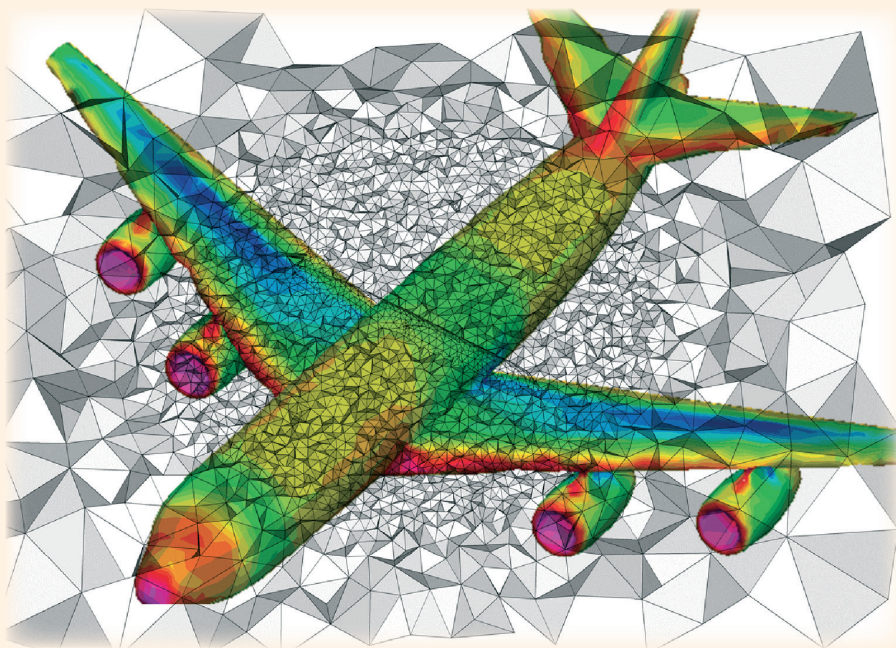
Используя вариант кинетических схем, модифицированный для решения задач магнитной газовой динамики с учетом действия гравитационного потенциала, было проведено моделирование поглощения вещества галактики черной дырой. Впервые прямым математическим моделированием было продемонстрировано образование коллинеарной космической струи. Задача решалась на сетке $8 \cdot 10^9$ пространственных узлов.

В настоящее время в Институте развиваются методы, позволяющие эффективно использовать гибридные вычислительные системы при адаптации на неструктурированных сетках. Важным инструментом современных высокопроизводительных вычислений являются алгоритмы для решения задач на динамически адаптивных сетках.

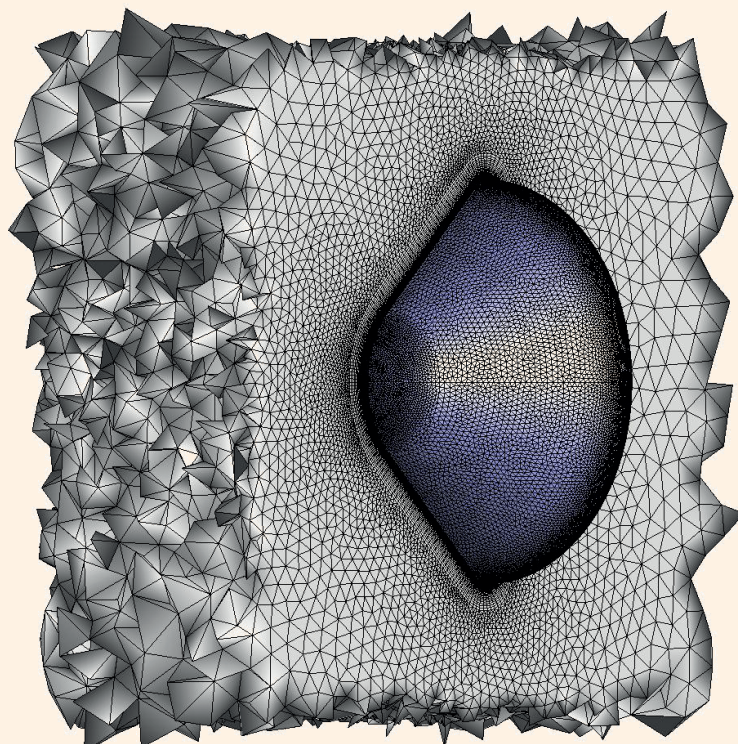
Проводимая в Институте линия на развитие логически простых и в то же время эффективных алгоритмов позволила создать действующий на основе регуляризованных уравнений газовой динамики открытый трехмерный код решения задач гидро- и газовой динамики.

Получил дальнейшее развитие метод локальных итераций решения неявных разностных схем для нелинейных параболических уравнений.

Одним из важных направлений деятельности ИПМ им. М. В. Келдыша РАН в области вычислительной математики является разработка численных методов высокого порядка точности для задач математической



физики. К таким методам относится разрывный метод Галеркина, который в настоящее время широко распространен и интенсивно развивается. К достоинствам этого метода можно отнести возможность получения вычислительных алгоритмов с желаемым порядком аппроксимации и использования неструктурированных сеток, а также компактный шаблон. В ИПМ им. М. В. Келдыша РАН разработаны для этого метода способы обеспечения выполнения энтропийного неравенства и новые типы лимитеров для сеток, содержащих ячейки различного типа. На основе этих разработок создан комплекс программ РАМЕГ3D для решения задач газовой динамики с теплопроводностью на неструктурированных сетках. Комплекс позволяет эффективно использовать современные многопроцессорные системы, в том числе и на графических процессорах.



Традиционным предметом исследований в Институте является взаимодействие проникающего и электромагнитного излучений со сложными средами. Создаются математические модели распространения фотонов и заряженных частиц, а также физических эффектов, сопровождающих их рассеяние в диэлектриках гетерогенной структуры, полупроводниках и газовых средах различной степени ионизации. Определяется отклик изделий микроэлектроники, линий связи, энергоемких материалов и защитных покрытий. Предсказательное математическое моделирование в этой области актуально для защиты спутников от излучений космического пространства, неразрушающего контроля объектов, обеспечения электромагнитной совместимости технических средств и т.д.

НОВЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ

Существенное достижение связано с развитием в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН перспективной области математического моделирования — создание вычислительных моделей с наследованием фундаментальных принципов физических моделей, основы которой заложены в работах академика С. К. Годунова. В частности, проведено исследование обобщенной (неавтономной) задачи Римана для уравнений газовой динамики, доказана ее корректность, получены точные решения. На ее основе построен метод повышенного порядка точности, которым впервые удалось провести адекватное моделирование процесса безударного сжатия в задачах газодинамического термоядерного синтеза. Предложена постановка вариационной задачи Римана и построено ее точное аналитическое решение. Эти результаты нашли применение в развитии методов для решения сопряженных задач газовой динамики и аэроакустики, позволили описать механизм генерации акустического тонового звука при истечении сверхзвуковой газовой струи, а также в развитии прорывных технологий сквозного расчета многофазных и многоматериальных гетерогенных сред с сильными деформациями контактных границ. Эффективные методы для этих задач строятся в рамках модели диффузной границы с привлечением аналитических решений составной задачи Римана — классического распада начального разрыва. Этот подход позволяет держать разрешение межфазной границы на несогласованной сетке в пределах 2–3 счетных ячеек. Технология сквозного расчета сопряженных задач имеет широкие прикладные применения (классические задачи аэродинамики, сопряженные задачи газодинамики и динамики твердого тела, газодинамики и упругости). Вычислительные алгоритмы просты, работают на не связанных с геометрией декартовых сетках. Это отвечает требованиям вычислительного примитивизма, которые необходимы для организации эффективных параллельных вычислений на современных и перспективных суперкомпьютерных системах.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ, ПРИКЛАДНОЕ И СИСТЕМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В современном суперкомпьютере десятки тысяч многоядерных процессоров и ускорителей вычислений. Подавляющее большинство представителей списка пятисот крупнейших вычислительных систем мира (TOP-500) имеют в своем составе 30 тысяч и более вычислительных ядер. Разработка системного и прикладного программного обеспечения для подобных вычислительных систем является серьезной фундаментальной проблемой. Она требует создания новых математических методов, новых алгоритмов, изначально обладающих большим запасом внутреннего параллелизма, адекватного высокому уровню параллелизма аппаратных средств.

Использование гибридных вычислительных систем для решения пилотных задач сопряжено с труднопреодолимыми фундаментальными проблемами создания эффективного прикладного параллельного программного обеспечения. Возможности ручной адаптации алгоритмов и программ к параллельным архитектурам принципиально отстают от высокой скорости развития аппаратных средств и низкоуровневых технологий их программирования. В связи с этим, автоматизация процесса разработки программ является актуальным направлением конструктивного снижения сложности создания высокопроизводительного прикладного суперкомпьютерного программного обеспечения.

В Институте создана и успешно развивается система автоматизации разработки параллельных программ DVM и ее версия для гибридных вычислительных систем — DVMH. Она существенно упрощает создание эффективного параллельного программного обеспечения для решения широкого круга прикладных и фундаментальных научно-технических задач с помощью гетерогенных современных и перспективных суперкомпьютеров. DVMH включает в себя компиляторы, отладчики и анализаторы производительности. Важной компонентой DVM является система SAPFOR, снижающая трудоемкость выявления параллелизма в последовательных программах и упрощающая переход от последовательных программ к параллельным. Разработанная система соответствует мировому уровню исследований в этой области и является альтернативой коммерческим решениям ряда западных компаний, таким как Intel Parallel Studio.

Важно отметить, что производительность программ, подготовленных с помощью DVMH, во многих случаях выше, чем у программ, разработанных с непосредственным использованием низкоуровневых технологий, а время, затраченное на их разработку, и объем программного кода, существенно ниже. И главное преимущество — использование DVM полностью избавляет прикладного специалиста от необходимости изучения деталей существующих и грядущих, быстро сменяющих одна другую, специфических технологий, оставляя эту неблагоприятную объемную работу разработчикам DVM.

Значительные успехи в институте достигнуты в области разработки методов и алгоритмов рациональной декомпозиции расчетных сеток и динамической балансировки нагрузки процессоров.

Характерное время между единичными отказами вычислительных устройств сокращается с увеличением числа узлов суперкомпьютеров. Этот факт ставит под вопрос саму возможность полноценного использования всей мощности суперкомпьютера для решения вычислительно емкой сильно связанной задачи на подробной многомерной расчетной сетке. Предложены методы, решающие проблему борьбы с отказами на алгоритмическом уровне, что позволяет практически без потери эффективности выполнять длительные расчеты на вычислительных системах, узлы которых подвержены отказам. Они ориентированы на решение задач, описываемых гиперболическими системами уравнений в частных производных. В их рамках часть вычислительного поля резервируется для адаптивного опережающего локального перерасчета фрагментов сеточных данных, теряемых в связи с возникающими отказами.

Разработаны детерминированные алгоритмы гарантированного заполнения выпуклыми полиэдрами трехмерных замкнутых многогранников. Разработаны алгоритмы адаптивного измельчения трехмерных расчетных сеток, обеспечивающие построение расчетных сеток для суперкомпьютерных расчетов.

Разработаны масштабируемые алгоритмы и методы, обеспечивающие высокую эффективность выполнения суперкомпьютерного моделирования на адаптивных расчетных сетках, учитывающие необходимость эффективного представления расчетных сеток, необходимость их динамической адаптации и динамической балансировки нагрузки ядер процессоров и ускорителей вычислений.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

До 1953 г. при расчетах использовались настольные электромеханические машины типа «Мерседес». В 1953 г. появились первые отечественные ЭВМ БЭСМ-1 и ЭВМ «Стрела». Они стали первоосновой методологии математического моделирования в Институте и в стране. Благодаря этому уже к 1966 г. появилась самая знаменитая серия вычислительных машин — БЭСМ-6.

В 2010 году при поддержке В. В. Путина, бывшего тогда Председателем Правительства Российской Федерации, в нашем Институте совместно с ФГУП «НИИ «Квант» была создана за 6 месяцев и в кратчайшие сроки начала использоваться на полную мощность первая в России и одна из первых в мире вычислительная система К-100 на графических платах производительностью 108 Терафлопс. Был преодолен определенный скепсис по поводу эффективности такой системы. А эффективность была достигнута за счет алгоритмов и программного обеспечения. Сейчас такая система вместе с пакетом прикладных программ, разработанных у нас, внедрена в целом ряде организаций. Наши алгоритмы и программное обеспечение позволяют использовать в полной мере вычислительные системы производительностью до 30 Петафлопс.

Сегодня вычислительные мощности Института — это семейство многопроцессорных вычислительных систем К-100, К-10, К-60 гибридной архитектуры, составляющих основу центра коллективного пользования (ЦКП).



НАУЧНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

В ИПМ им. М. В. Келдыша РАН созданы программные комплексы синтеза реалистичных изображений на базе физически корректного моделирования распространения света в различных средах. Они позволяют с высокой точностью и эффективностью рассчитывать освещенность реальных сцен, моделировать светопроводящие и осветительные системы, оптические свойства новых материалов.

Разработана технология виртуального прототипирования энергосберегающих осветительных устройств и оптических систем дополненной реальности, позволяющая проектировать такие устройства при помощи компьютерного моделирования. Создана кросс-платформенная специализированная технология программирования, позволяющая на порядок сократить время переноса алгоритмов компьютерной графики на графические процессоры с использованием аппаратного ускорения современных GPU.

Разработана система визуализации для отечественной операционной системы реального времени. Она предназначена для использования в бортовых комплексах гражданской авиации на специализированных вычислительных платформах с пониженным энергопотреблением. Реализация системы предполагает ее сертификацию для систем, критичных с точки зрения безопасности. Работа обусловлена необходимостью импортозамещения для обеспечения технологической независимости, кибербезопасности и минимизации рисков несанкционированного вмешательства в работу авионики.



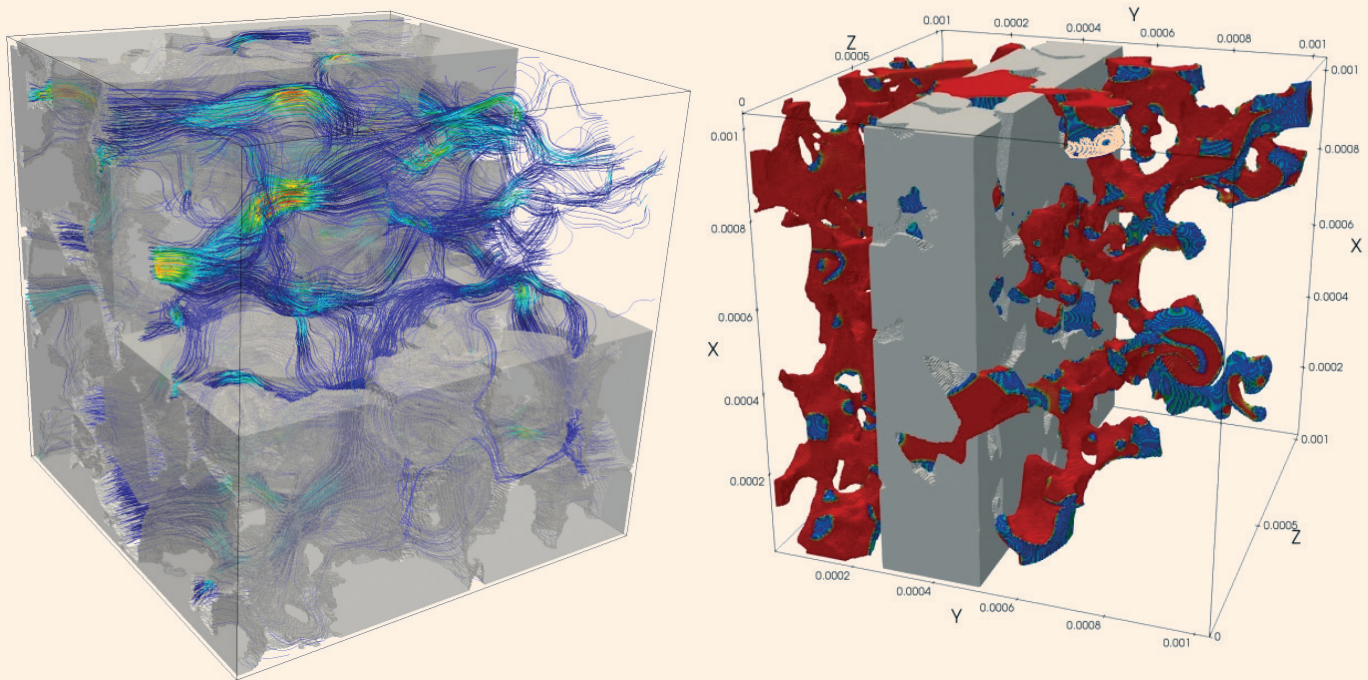
АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ «ФАЗОВОГО ПОЛЯ» ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ «ЦИФРОВОЙ КЕРН»

В Институте активно развивается направление, связанное с созданием математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для описания многофазных микротечений. Его основу составляют термодинамически корректные гидродинамические модели типа «диффузной границы» (или «фазового поля»), которые позволяют однородным по пространству образом описывать движение многофазной жидкости в областях сложной формы и с прямым разрешением динамики границ раздела фаз и капиллярных эффектов. Необходимость подобных инструментов актуальна для разработки многих современных инженерных и медицинских технологий, например, развития технологий «лаборатория на чипе» и микрогидродинамических устройств.

Основным приложением этой тематики в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН являются средства моделирования технологии «цифровой керн» для нужд нефтяного инжиниринга. В этом случае область течения описывается воксельной моделью, построенной на основе микрофотограммы образцов пород-коллекторов нефти и газа. Применение технологии позволяет радикально улучшить уровень представлений о сложных комплексных процессах, сопровождающих нефтедобычу, сократить длительность лабораторных экспериментов по определению свойств нефтесодержащих пород, подбору и обоснованию широкого спектра методов увеличения нефтеотдачи. Как следствие, это приводит к увеличению предсказательной силы крупномасштабных постоянно-действующих геолого-технологических моделей нефтегазовых месторождений и качественному повышению технико-экономических решений по разработке.

Используемые в работе уравнения модели являются квазигидродинамической регуляризацией уравнений типа Навье–Стокса–Кана–Хилларда. В рамках рассматриваемого класса моделей границы раздела фаз представлены не как математические поверхности, а как «тонкие» зоны ненулевой толщины, в пределах которых свойства среды изменяются быстро, но непрерывно. Это позволяет описывать эволюцию межфазных границ с учетом их практически произвольных топологических превращений, в частности, описывать слияние и дробление дисперсных капель, а также произвольные изменения

их формы. Вместе с тем, модель позволяет корректно описывать процессы разделения фаз, учет силы поверхностного натяжения и капиллярных эффектов, влияние которых для рассматриваемого класса задач является определяющим. Дополнительные регуляризующие слагаемые являются диссипативными и играют роль регуляризаторов явной разностной схемы. В результате для улучшения свойств устойчивости алгоритма не требуется его дополнительная монотонизация. Разработанные вычислительные алгоритмы допускают эффективное распараллеливание, а их программная реализация пригодна для эффективного использования современных массивно-параллельных вычислительных систем высокой производительности. Это позволяет анализировать задачи представительной сеточной размерности, в том числе течения в воксельных моделях реальных пористых сред с размерностью до 50–300 млн активных ячеек с реалистичными сценариями вытеснения.



АЭРОАКУСТИКА

Вычислительная аэроакустика как научное направление начала развиваться в ИПИМ им. М. В. Келдыша РАН с начала 2000-х годов. В отличие от классической акустики, занимающейся распространением акустических возмущений в различных средах, основными целями аэроакустики являются изучение пространственно-распределенных акустических источников, формируемых при внешнем обтекании движущихся объектов, в струйных газовых потоках и других нестационарных турбулентных течениях, а также оценка шума, производимого этими источниками. В этом смысле аэроакустика больше относится к нестационарной турбулентной газовой динамике, чем к акустике, а вычислительная аэроакустика — к нестационарной вычислительной газовой динамике повышенной корректности и точности, требуемым для правильного моделирования разномасштабных газодинамических явлений.

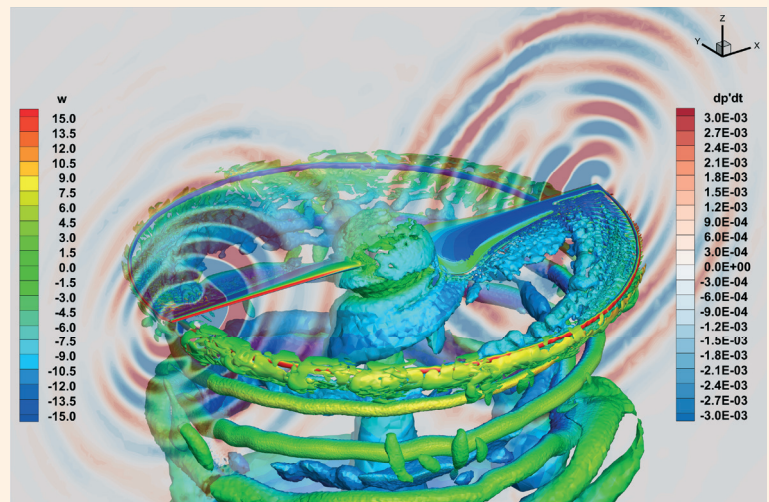
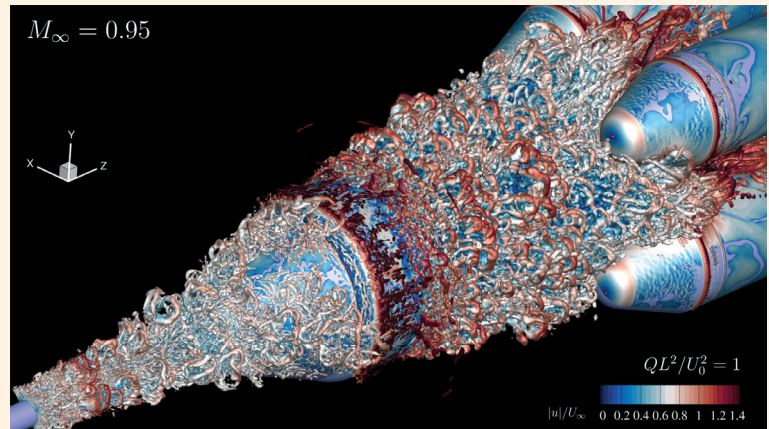
Задачи поиска акустических источников и путей снижения генерируемого ими шума, в первую очередь, востребованы в приложениях авиационной промышленности для оценки шума летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, квадрокоптеров, ракет космического назначения и др.), поэтому в научной литературе аэроакустику часто называют авиационной акустикой. В наше время, помимо авиационных приложений, задачи аэроакустики становятся актуальными при проектировании наземной транспортной техники (автомобилей, поездов), а также в производствах, связанных с высокоскоростными течениями газа.

Разрабатываются математические модели, численные методы, вычислительные технологии и программные продукты, обеспечивающие эффективное решение задач нестационарной газовой динамики и аэроакустики на современных суперкомпьютерах. Все разработки находятся на передовом уровне мировой науки. В их число входят новые неэкономные гибридные RANS-LES подходы для проведения вихреразрешающих расчетов турбулентных течений, оригинальные экономные численные схемы повышенной точности для неструктурированных сеток, новые формулировки метода погруженных границ, методы адаптации подвижных сеток, генерации синтетической турбулентности с заданными свойствами и др. Для оценки шума в дальнем поле применяется эффективная реализация интегрального метода, использующего данные на окружающих акустический источник поверхностях. Также разрабатывается вычислительный инструментарий для постпроцессорного

анализа полученных в ходе вычислительного эксперимента пространственно-временных данных большого объема, включающий методы спектрального анализа, численный бимформинг, метод декомпозиции динамических мод и др.

Все разработанные модели, методы и вычислительные технологии реализованы в институтском программном комплексе NOISEtte, обладающем высокой параллельной эффективностью и масштабируемостью. Современная версия кода NOISEtte позволяет проводить крупномасштабные расчеты на суперкомпьютерах гибридной архитектуры, оптимальным образом задействуя CPU-ядра и графические ускорители. Работа над программным комплексом ведется на высоком уровне разработки с ориентацией на лучшие мировые аналоги.

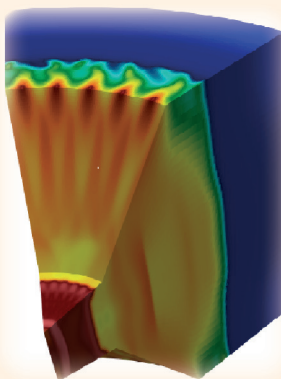
С помощью кода NOISEtte успешно решены задачи по моделированию аэродинамического шума самолета, шума турбулентных струй, пульсационных нагрузок на поверхности ракеты космического назначения на этапе выведения, проведены расчеты аэродинамических и акустических характеристик винтов вертолета и дрона, решен ряд задач турбомашиностроения.



СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКИ ТОКОНЕСУЩЕЙ ПЛАЗМЫ

Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии, физические процессы в космосе — эти и многие другие разделы физики и техники развиваются на основе исследований импульсной плазмы с высокой плотностью энергии. В природе вещество в условиях высокой плотности и давления существует внутри звезд под действием гравитации. Однако электромагнитные силы значительно превосходят гравитационные. Современные электрогенераторы позволяют создавать импульсные разряды с амплитудой тока до десятков миллионов ампер. Электромагнитное сжатие позволяет исследовать в лабораторных экспериментах плотную, нагретую до миллионов градусов плазму, а также сверхсильные магнитные поля, действие которых на хорошо проводящие среды эквивалентно давлению в десятки миллионов атмосфер.

Физика электроразрядной плазмы чрезвычайно разнообразна, в ней переплетаются нелинейные волновые процессы, кинетические, тепловые и гидродинамические неустойчивости. Масштабы плазменных структур различаются на порядки величин. Полноценные вычислительные эксперименты с плазмодинамическими моделями могут быть реализованы лишь на суперкомпьютерах петафлопсной и более высокой производительности. Соответствующее программное обеспечение создается в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН с использованием современных технологий программирования. Коды развиваются в тесном контакте с физиками из академических и других организаций. Одним из примеров такого сотрудничества является моделирование радиационно-плазмодинамических процессов при



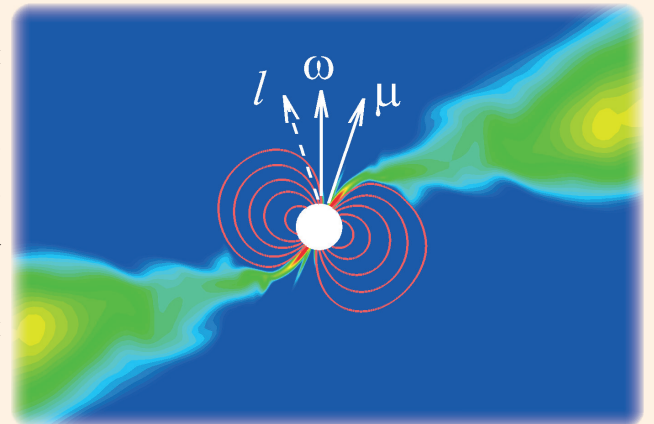
сопровождении экспериментов на сильноточном генераторе АНГАРА-5-1 (ТРИНИТИ, Троицк–Москва), нацеленных на создание новых конструкций источников излучения ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов высокой яркости.

ЗАДАЧИ АСТРОФИЗИКИ

Астрономические наблюдения показывают, что одними из самых интересных объектов во Вселенной являются джеты — струи вещества, истекающего из различных источников. Скорость движения вещества струи и ее коллимированность являются не до конца объясненными загадками.

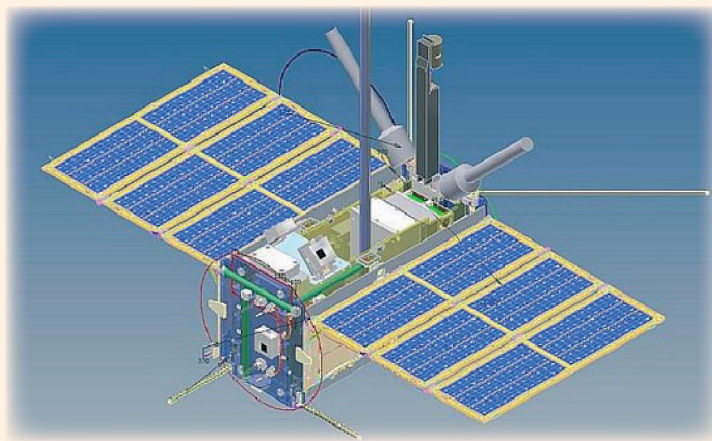
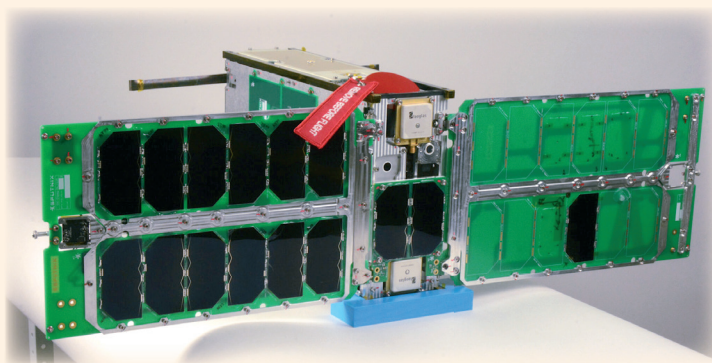
Использование установок типа Z-пинч позволяет проводить хорошо контролируемые и диагностируемые лабораторные эксперименты для изучения лабораторных джетов с масштабными параметрами, близкими к параметрам джетов молодых звезд. Это позволяет наблюдать процессы, недоступные для астрономических измерений. Такие эксперименты проводятся, в частности, на установке ПФ-3 (Плазменный фокус, НИЦ «Курчатовский институт»). Анализ результатов экспериментов с гелием показывает, что после прохождения первого сверхзвукового выброса за ним образуется область с низкой концентрацией, так называемый вакуумный след, благодаря которому последующий выброс практически не испытывает сопротивления окружающей среды и распространяется, оставаясь коллимированным. Результаты численного моделирования распространения двух выбросов подтверждают эту точку зрения. Этот эффект может быть существенным и для джетов молодых звезд. Во многих случаях джеты истекают из двойных звездных систем, в которых имеет место аккреция — падение вещества на один из компонентов с захватом. Механизм этого явления нуждается в серьезном изучении.

Проведено трехмерное магнитогидродинамическое моделирование аккреции на намагниченную звезду, у которой как магнитная ось, так и ось вращения наклонены относительно оси вращения диска. Установлено, что вещество внутренних частей диска переходит на орбиты, перпендикулярные магнитной оси звезды. Эти орбиты прецессируют из-за магнитного взаимодействия между магнитосферой и диском. В результате проведения серии численных экспериментов установлено, что при увеличении магнитного момента звезды область прецессии диска увеличивается. Полученные результаты могут быть применены к различным типам звезд, в окрестности которых наблюдаются признаки наличия прецессирующих наклонных дисков.



МАЛЫЕ СПУТНИКИ

Одно из перспективных и интенсивно развиваемых во всем мире направлений проведения исследований в космосе — это использование малоразмерных спутников для дистанционного зондирования Земли, связи, межпланетных миссий, выполнения технологических экспериментов, образования. Качество функционирования таких аппаратов и успех решения поставленных перед ними задач во многом определяются совершенством и надежностью их систем управления и навигации. Институт с начала 90-х годов в содружестве с отечественными и зарубежными организациями промышленности и образовательными учреждениями принимает активное участие в выработке стратегии применения малых спутников и разработке алгоритмов управления их движением. Среди всего ряда малых спутников особое внимание уделяется работе с микро- и наноаппаратами массой до 100 кг. Вопросы исследования динамики, разработка алгоритмов управления угловым и орбитальным движением и определения фактической ориентации по результатам летных испытаний, компьютерная и полунатурная отработка моделей и алгоритмов, проведение фундаментально-поисковых работ, выбор перспективных орбитальных конфигураций и способов управления — вот круг вопросов, активно рассматриваемых в настоящее время в Институте. Направление «Динамика и управление движением малогабаритных спутников» развивается при поддержке Минобрнауки, РФФ, РФФИ, отечественной промышленности и международной кооперации.

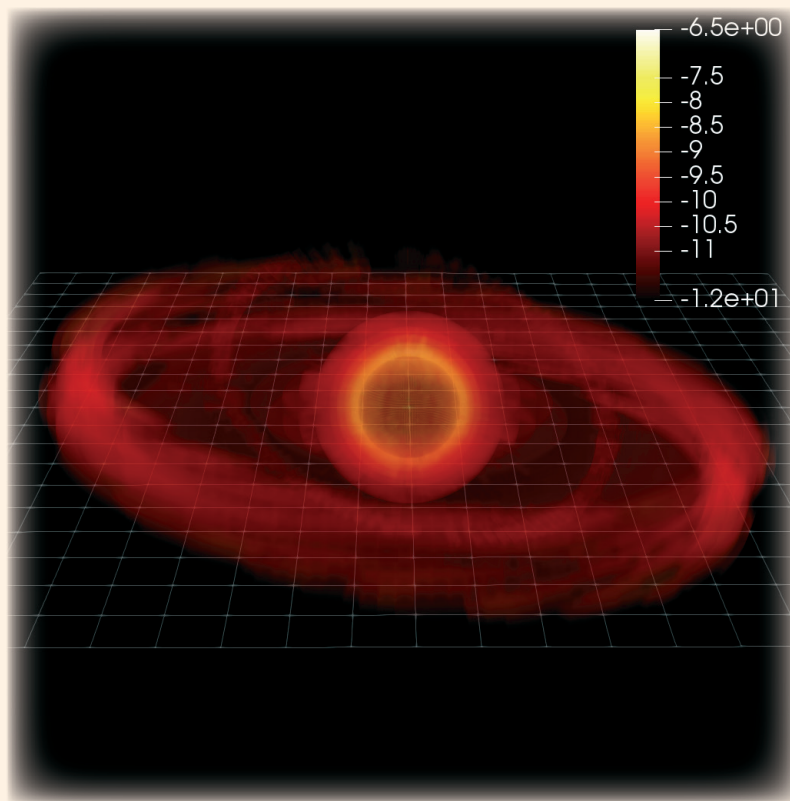


МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

В рамках работ, проводящихся Роскосмосом по созданию автоматизированной системы прогнозирования опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП), в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН осуществляется мониторинг возникновения опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. Разработанная система сбора и обработки оптических измерений обеспечивает поддержание в актуальном состоянии каталога космических объектов (КО) техногенного происхождения в области высоких орбит, ведение базы данных сегмента АСПОС ОКП в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, выявление опасных объектов и событий в ОКП и долгосрочное прогнозирование состояния орбитальных параметров космических объектов.

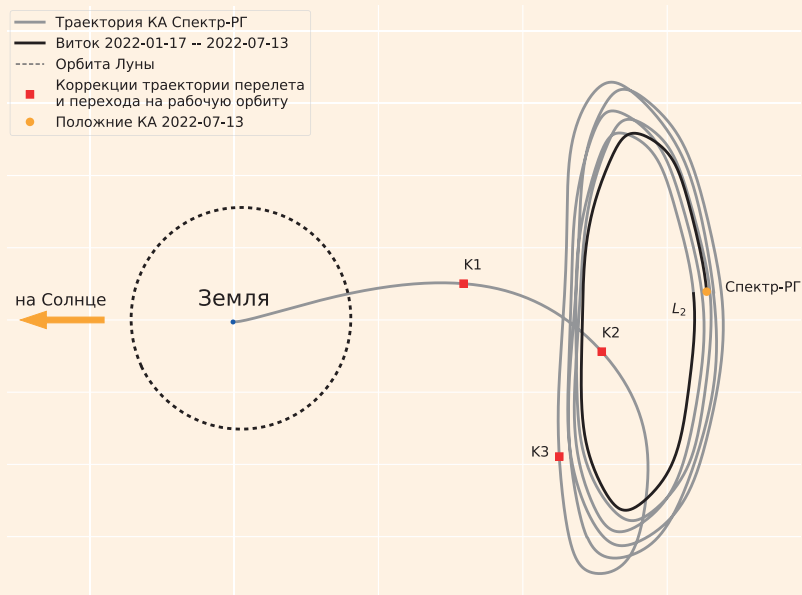
В Институте разработана статистическая модель заполнения космического пространства объектами техногенного происхождения, которая опирается на каталог орбит КО, построенный на базе отечественных и иностранных источников. В качестве примера на рисунке представлено изображение распределения концентрации космического мусора, построенного на основе разработанной модели.

Предлагаемые методы отслеживания космических объектов помогли в обнаружении новых комет. Было открыто 6 комет, в том числе первая комета в истории Российской Федерации, и более сотни астероидов.



БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-РГ»

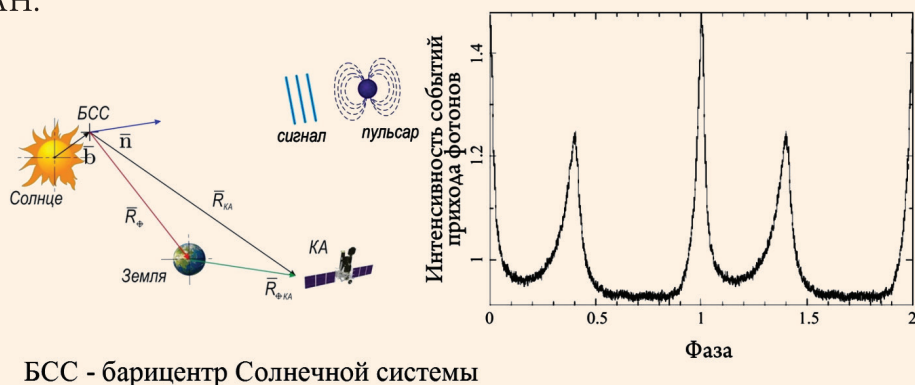
«Спектр-РГ» — российско-немецкая орбитальная астрофизическая обсерватория, предназначенная для построения полной карты Вселенной в рентгеновском диапазоне энергий 0,2–30 кэВ. Космический аппарат (КА) создан в АО «НПО им. С. А. Лавочкина». КА обращается по гало-орбите с периодом 6 месяцев вокруг точки Лагранжа L_2 системы Солнце–Земля по орбите радиусом до 400 тыс. км, плоскость которой перпендикулярна гелиоцентрическому радиус-вектору точки либрации, и стал первым отечественным КА, облетевшим указанную либрационную точку. Институт выполняет баллистико-навигационное обеспечение и сопровождение КА «Спектр-РГ». К настоящему времени выполнены расчеты коррекций, необходимые для поддержания геометрии траектории КА «Спектр-РГ» на квазипериодической орбите около лагранжевой точки либрации и обеспечения условий видимости КА с отечественных наземных пунктов наблюдения. Выполненные расчеты и их реализация позволили произвести наблюдения рентгеновскими телескопами, установленными на борту КА «Спектр-РГ», и получить новые научные данные. Для баллистико-навигационного обеспечения полета КА «Спектр-РГ» разработана методика проведения коррекций, уменьшающих выход орбиты КА из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира, что расширяет радиовидимость КА и увеличивает время пребывания КА в окрестности точки либрации L_2 после проведения коррекции.



ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО СИГНАЛАМ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ

Стандартным способом определения параметров движения космического аппарата в процессе управления является использование данных с радиотехнических и оптических средств, расположенных на поверхности Земли. Этот способ является достаточно надежным, но не лишен недостатков. В настоящее время во всем мире активно изучаются возможности и перспективы альтернативных методов навигации космических аппаратов. Один из таких предлагаемых методов — навигация с использованием в качестве опорных объектов нейтронных звезд — пульсаров. Обнаруженные более пятидесяти лет назад, эти небесные объекты обладают уникальным свойством — импульсным излучением с высокой стабильностью периода следования импульсов, поэтому они могут стать основой для установления новой системы навигации во всей Солнечной системе и за ее пределами. Пульсары, благодаря быстрому вращению и сверхсильному магнитному полю, являются природными высокостабильными генераторами сигналов, причем предпочтительным является рентгеновский диапазон, т.к. только в нем размер и масса системы будут достаточно малы, чтобы говорить о возможности ее установки на борт КА в качестве служебной.

В этом направлении ведутся работы в организациях многих стран, в том числе в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.



БСС - барицентр Солнечной системы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

На основе технологий искусственного интеллекта было разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение для широкого мониторинга открытого сегмента Интернета с целью добычи фактических данных, необходимых для идентификации математической модели распространения в РФ эпидемии КОВИД-19.

Теоретические исследования подкреплены практически значимыми результатами экспериментальной проверки эффективности предложенной методики работы со структурированными (базы данных) и неструктурированными (тексты на веб-страницах и в социальных сетях) данными из сети Интернет. Предложенные программные решения и их техническая реализация были протестированы на специально собранной аппаратной платформе, соединенной с суперкомпьютером К-60 в ВЦ ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

Исследования проведены в рамках комплексного научного исследования, выполняемого консорциумом научных организаций под руководством Федерального государственного унитарного предприятия «Российский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина». Работа признана РАН одной из лучших за 2021 год.



БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Применительно к задачам анализа больших массивов данных с использованием искусственного интеллекта в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН разработаны кинетические методы анализа нестационарных случайных процессов, использующие непараметрическое сравнение выборочных функций распределения многомерных рядов данных и функционалов от них, имеющих существенно меньшие размерности, чем исходные анализируемые выборки. Эти методы реализованы в численных алгоритмах и программных продуктах для решения статистических задач большой размерности.

Основные результаты.

- Для нестационарных временных рядов введена статистика согласованного уровня стационарности и проведено ее табулирование в стационарном случае. Эта статистика использовалась как основной теоретический инструмент при моделировании предикторов разладки, в задачах оптимизации объема выборки и кластеризации данных;
- Для стохастических динамических систем доказано существование эквивалентной по Чернову средней полугруппы, что позволило разработать генератор ансамбля нестационарных траекторий. Эта методика лежит в основе оптимизационных задач стохастического управления;
- Для случайных графов ближайших соседей были получены асимптотические по числу вершин распределения графов по числу фрагментов (распределение Вигнера), фрагментов по числу вершин, вершин по степеням (многомерное нормальное распределение). Эти результаты существенны для анализа возникновения неслучайных коалиций;
- Для нестационарных потоков событий в системах массового обслуживания построена кинетическая модель блуждания абонентов, позволяющая моделировать показатели качества и надежности беспроводных сетей, такие как время ожидания начала обслуживания, средняя длина очереди, вероятность обрыва связи;
- Для задач автоматической обработки текстов на естественных языках разработан метод коррекции ошибок, основанный на фрагментации больших текстовых массивов. Также исследовано влияние различных методов предобработки текстов на идентификацию тематических и авторских атрибутов текстов.

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

С 1970 года по инициативе академика РАН (тогда чл.-корр. АН СССР) Д. Е. Охоцимского в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН разрабатывалось направление построения систем управления сложными механическими системами с элементами искусственного интеллекта, позднее это направление получило название Робототехника. При Президиуме АН СССР был создан Совет по робототехнике.

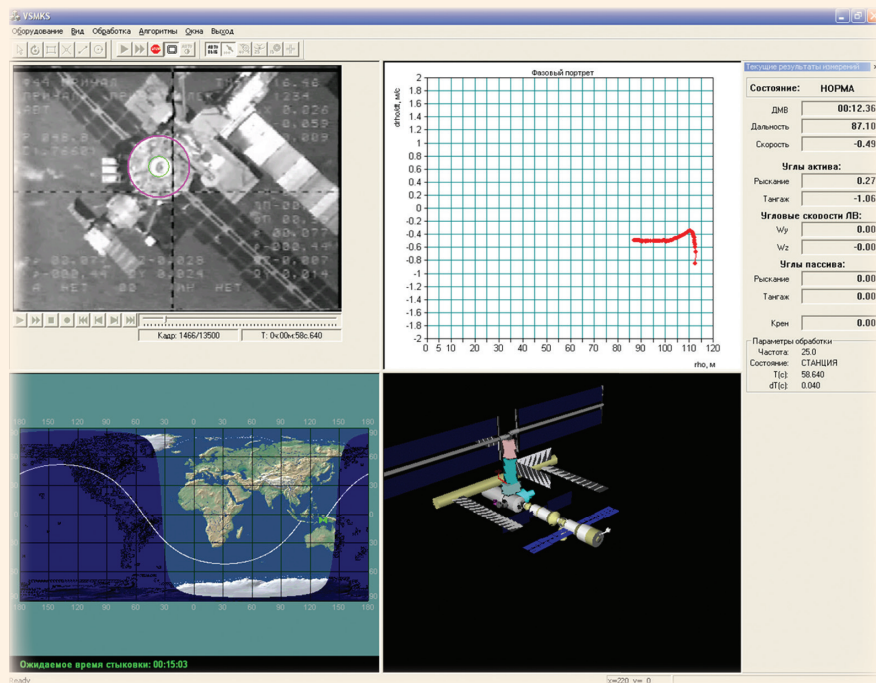
В ИПМ активно велись работы по многим направлениям робототехники:

построение математических моделей и алгоритмического обеспечения; программная реализация и эксперименты с СУ; натурное и полунатурное макетирование программно-аппаратных комплексов (одни из первых в мире действующие образцы шагающих машин; сборочные и манипуляционные комплексы); исследование и разработка систем информационного обеспечения робототехнических систем (лазерные дальномеры, ультразвуковые и фотометрические системы), с 1973 года исследование и разработка систем технического зрения реального времени.

Наиболее значимыми результатами работ последнего десятилетия явились следующие:

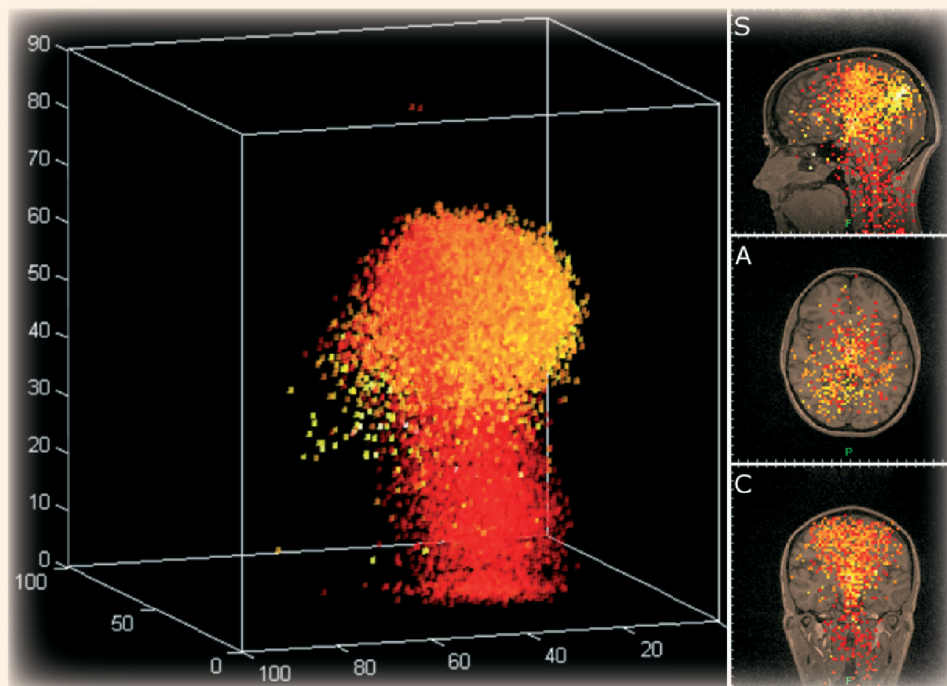
- Для промышленных роботов разработана технология высокопроизводительной роботизированной сборки сложных изделий машиностроения. Разработан комплекс — демонстратор технологии;
- Разработано унифицированное программное обеспечение систем управления сборочными роботами;
- Разработан ГОСТ по безопасности совместной работы человека в рабочей зоне робота. ГОСТ принят к реализации в 2021 году;
- Найден способ определения радиуса закругления иглы сканирующего туннельного микроскопа и рельефа поверхности с точностью до 1 нм по результатам сканирования подложки. Способ реализован в туннельном микроскопе, находящемся в РХТУ им. Д.И. Менделеева. Способ имеет фундаментальное значение для туннельной микроскопии, так как впервые позволяет теоретически обосновать получаемое изображение подложки с точностью до 1 нм;
- Разработано и исследовано на компьютерной модели алгоритмическое обеспечение шагающего робототехнического комплекса, совершающего сложные целенаправленные перемещения;

- Разработаны унифицированная технология и программные средства создания информационного обеспечения подвижных роботов на основе сбора и обработки зрительных данных в масштабе реального времени;
- На основе этой технологии (совместно с ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ПАО «Промтрактор» и ООО «МИКОНТ») создан демонстрационный образец «интеллектуального» многофункционального трактора, получивший золотую медаль выставки «Золотая осень 2018»;
- Разработан прототип системы автоматизированного мониторинга процессов сближения и стыковки космических аппаратов с международной космической станцией;
- Модульное построение информационно-измерительных систем технического зрения, разработанное по гранту РФФИ–РЖД (2012 г.) положено в основу направления развития инспекционных комплексов РЖД (2016 г.);
- В настоящее время выполняется ряд государственных контрактов в интересах министерств и ведомств по практическому внедрению систем технического зрения реального времени.



РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

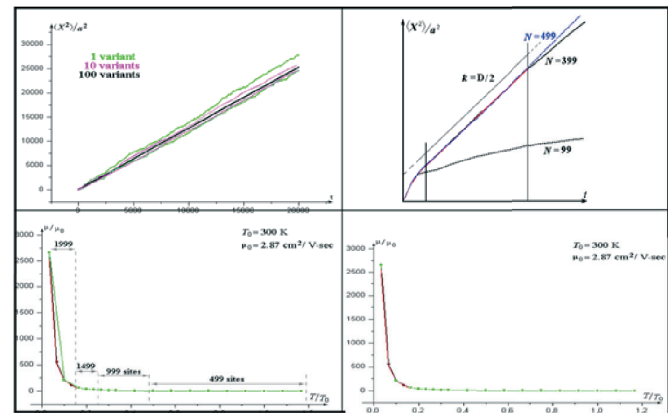
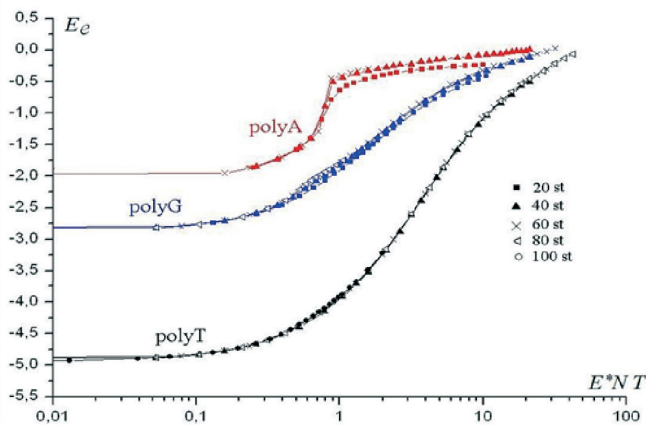
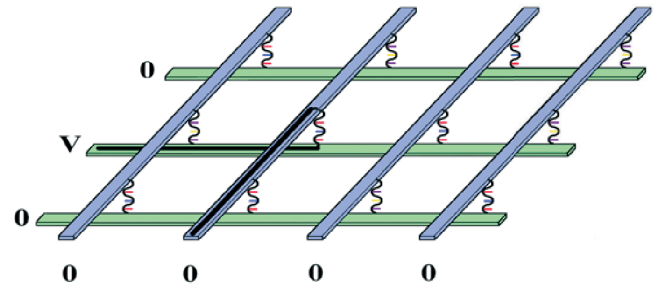
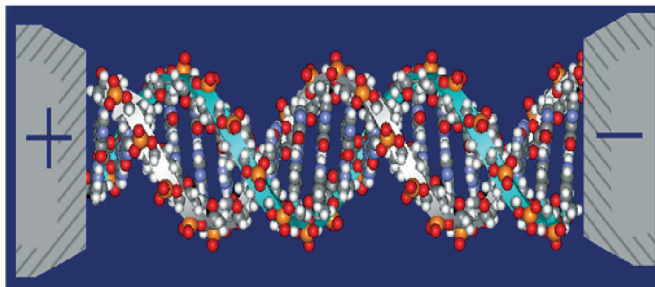
Экспериментально обнаружено, что организм человека генерирует спонтанные электромагнитные поля, достаточные для реконструкции пространственного распределения источников. Создан новый метод анализа данных многоканальных измерений, с помощью которого были восстановлены трехмерные функциональные структуры головы, сердца и скелетных мышц человека по внешним магнитным полям. Метод может применяться к анализу электрических и магнитных полей, что позволяет ставить вопрос о создании принципиально новых диагностических систем, показывающих области аномально высокой или подавленной активности нервной или мышечной систем. Изменения активности могут быть связаны с теми или иными патологическими процессами и указывать на необходимость применения других диагностических методов.

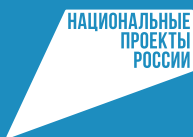


НАНОБИОЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ДНК

Нанобиоэлектроника является новым быстроразвивающимся направлением, интегрирующим достижения нанoeлектроники и молекулярной биологии. В основе нанобиоэлектроники лежит использование процессов переноса заряда в биомакромолекулах и созданных на их основе молекулярных структур нанометрового масштаба. Основные направления нанобиоэлектроники включают создание биосенсоров, сложных нанoeлектронных схем на основе ДНК, конструирование нанобиотранзисторов, диодов, наномоторов, нанотранспортеров и т.д. Создание таких устройств невозможно без построения и разработки их квантово-механических моделей и проведения суперкомпьютерных расчетов.

Моделирование переноса заряда в биополимерах





ИПМ им. М. В. Келдыша РАН с ноября 2019 года является участником Математического центра мирового уровня «Московский центр фундаментальной и прикладной математики» (МЦФПМ), который организован как консорциум из трех организаций: МГУ им. М. В. Ломоносова, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН.

В ИПМ им. М. В. Келдыша РАН было образовано отдельное структурное подразделение — Отделение МЦФПМ и была создана международная Конкурсная комиссия для отбора научных проектов Отделения МЦФПМ на конкурсной основе.

Научные исследования по Программе создания и развития МЦФПМ проводятся в Отделении МЦФПМ в рамках научно-исследовательских проектов, отобранных в результате открытых конкурсов по четырем направлениям: теоретическая математика, вычислительная математика, математическое моделирование и высокопроизводительные вычисления. В 2022 г. таких проектов было 12 и в их реализации участвовало 54 научных сотрудника, из них 20 ведущих ученых — докторов наук и 28 молодых исследователей (до 39 лет).

По направлению теоретическая математика проводятся исследования разностных операторов на графах, исследования конечномерных и бесконечномерных аттракторов, инерциальных многообразий и связанных с ними спектральных и интегральных неравенств. Также проводятся исследования сингулярности решений уравнений и систем уравнений в частных производных.

По направлению вычислительная математика проводятся исследования по разработке методов высокой точности для решения уравнений математической физики, в том числе вариантов разрывного метода Галеркина, монотонных бикомпактных схем для решения уравнений гидрогазодинамики, численных методов для моделирования газодинамики смесей на основе регуляризованных уравнений.

По направлению математическое моделирование проводятся исследования динамики и управления движением малых космических аппаратов в групповом полете, работы по математическому

моделированию движения особых околоземных космических объектов, проводится моделирование динамики канала электрического пробоя с прямым разрешением микроструктуры среды, а также моделирование в прикладных задачах физики плазмы: в ловушках-галатеех и в задаче создания стационарного плазменного двигателя.

По направлению «Высокопроизводительные вычисления» проводятся исследования по моделированию задач высокотемпературной газовой динамики, проводится разработка вычислительных технологий для решения сопряженных задач газовой динамики и динамики твердого тела, а также проводятся исследования по моделированию функциональной структуры головного мозга человека.

Отделение МЦФПМ в 2022 году выступило соорганизатором шести научных конференций.



ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

С 2019 г. в рамках программы «Наука и Университеты» функционирует суперкомпьютерный Центр коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Он стал результатом развития предыдущей стратегии Института, нацеленной на достижение прорывных научных результатов с помощью современной суперкомпьютерной техники. Совокупная пиковая производительность вычислительных кластеров ЦКП составляет на сегодняшний день порядка 0.5 Петафлопс. Однако развиваемая инфраструктура уже позволяет довести эту характеристику до 10 Петафлопс и выше. Главное в этом вопросе состоит не только в наращивании мощности вычислительных систем, но и в качестве используемой алгоритмической базы. В этом направлении в Институте накоплен богатый опыт разработки параллельных алгоритмов и комплексов программ для суперЭВМ в таких научных направлениях как ядерная физика, физика плазмы, материаловедение, вычислительная аэро- и гидродинамика, исследования для нефтегазовой отрасли, микроэлектроники, медицины, экологии.



НАУКА
И УНИВЕРСИТЕТЫ



С 2020 года ИПМ им. М. В. Келдыша РАН является участником Научного центра мирового уровня «Сверхзвук». Данный шестилетний проект создан для решения фундаментальных научно-технических проблем, связанных с созданием нового сверхзвукового пассажирского самолета. Консорциум, выполняющий поставленные научные задачи, состоит из 7 российских организаций: ЦАГИ, являющийся инициатором и координатором Центра, ИПМ, ЦИАМ, МГУ, МАИ, Пермский центр УрО РАН, ГосНИИАС.

В рамках Центра мирового уровня «Сверхзвук» ИПМ занимается численным исследованием аэродинамических и акустических свойств крыла сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки. Проводимые исследования потребовали дополнительной разработки моделей турбулентности, соответствующих рассматриваемым режимам полета, численных методов повышенной точности для неструктурированных сеток, а также развития методов «умного» анализа получаемых в ходе вычислительных экспериментов больших объемов данных (методы численного бимформинга и декомпозиции динамических мод).

Работы выполняются согласно принятой на весь период Программе создания и развития Научного центра мирового уровня «Сверхзвук», с ежеквартальной и годовой отчетностью. В работах принимают участие 20 сотрудников ИПМ, из них половина — молодые ученые. Сотрудники Сектора вычислительной аэродинамики и аэроакустики составляют ядро научного коллектива.

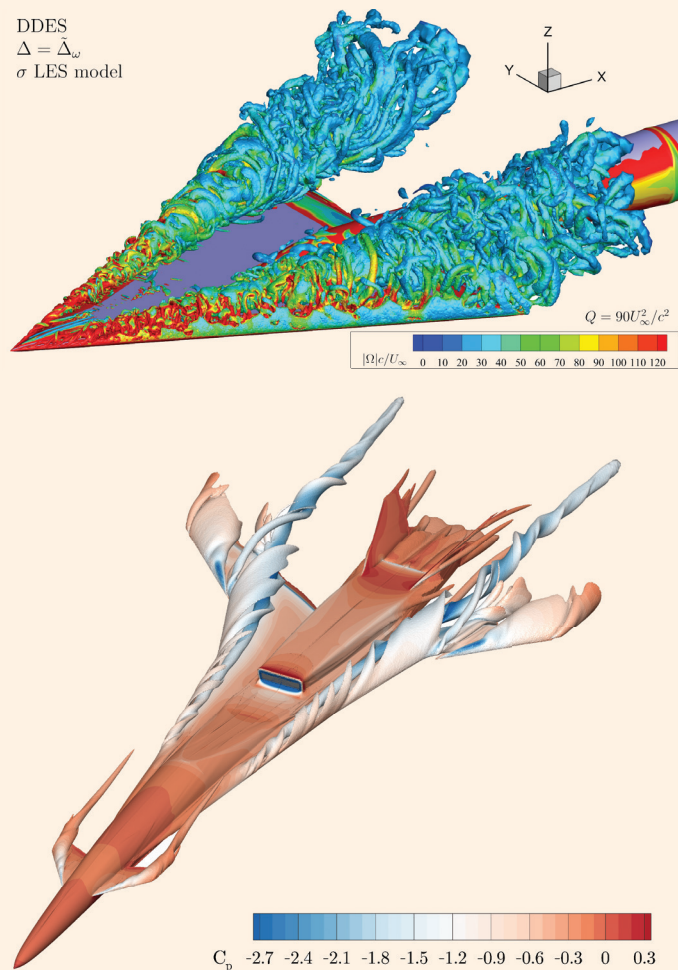
В 2020–2022 гг. проведены исследования по улучшению математических моделей и численных методов для решения задач аэродинамики и аэроакустики, а также по развитию программного комплекса NOISEtte, реализующего разработанные технологии. Содержание выполненных исследований отражено в научных отчетах и публикациях.

В ходе работы рассмотрены методы моделирования турбулентных течений, подходящие для исследуемых режимов полета сверхзвукового пассажирского самолета, в том числе большое внимание уделено гибридным моделям вихререзающего моделирования нестационарных турбулентных течений. В рассматриваемых моделях реализован ряд поправок и, в частности, современная версия поправки на

кривизну линий тока и вращение. При разработке вычислительного метода предложена и новая модификация используемых экономных численных схем повышенной точности, основанных на квазиодномерной реберно-ориентированной реконструкции переменных, а именно добавлена возможность проведения реконструкции в пограничной области течения вдоль криволинейного шаблона, учитывающего направления линий тока. Все улучшения протестированы на численном решении канонической задачи о формировании конечного вихря. Корректность предложенных модификаций подтверждена также в процессе моделирования аэродинамического шума в дальнем поле при дозвуковом обтекании трехкомпонентной модельной конфигурации прямого крыла с выпущенной механизацией на режиме посадки. Для валидации постановок со сверхзвуковыми скоростями проведен расчет задачи об обтекании дельтовидного крыла для геометрии как с закругленными, так и острыми передними кромками и выполнено сравнение с экспериментальными данными и расчетами других авторов.

Выполненная работа позволила к концу 2022 года провести моделирование обтекания геометрии прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки с учетом отклонения носков и элевонов и работы силовой установки.

Все проводимые расчеты ведутся с помощью программного комплекса NOISEtte на неструктурированных сетках с числом узлов порядка десятков миллионов с использованием эффективных моделей гетерогенных вычислений, в том числе при задействовании графических ускорителей.



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Образовательная деятельность как часть кадровой политики началась в Институте с момента его образования. Среди первых аспирантов были поступившие еще в аспирантуру МИАН им. В. А. Стеклова: С. К. Годунов, К. В. Брушлинский, Н. Н. Ченцов и др. Аспирантура в те годы была научной, и основная нагрузка, как и ответственность, ложились на научного руководителя. Необходимо выделить почти тридцатилетнее успешное руководство аспирантурой, начиная с 1963 года, Константином Владимировичем Брушлинским.

С передачей институтов РАН в ФАНО РФ, а затем в МОН РФ и принятием в 2012 году закона об образовании (ФЗ №273) с последующими изменениями, дополнениями, а также постановлениями Правительства РФ и приказами Минобрнауки, правовая основа образовательного процесса существенно изменилась. В соответствии с этими документами был создан «Научно-образовательный отдел», на который было возложено непосредственное осуществление всей научно-образовательной деятельности в Институте, включая работу аспирантуры, взаимодействие с вышестоящими организациями и т.д. Общее руководство и контроль за работой аспирантуры осуществляет Ученый совет Института.

Выпускники аспирантуры продолжают славные традиции наших учителей, связывая свою научную жизнь с Институтом.



МЕЖДУНАРОДНАЯ ОЦЕНКА РАБОТ ИНСТИТУТА В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

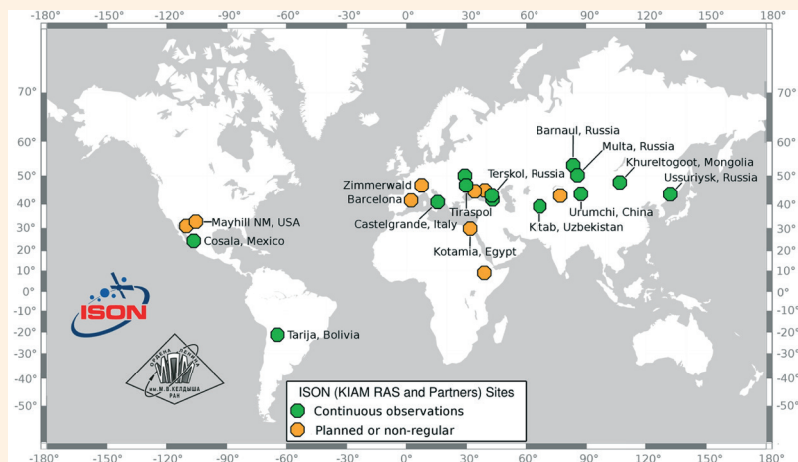
На протяжении всего периода своего существования от основания и до настоящего времени ИПМ им. М. В. Келдыша РАН пользуется заслуженным авторитетом среди отечественного и международного научных сообществ. Высокий научный уровень проводимых исследований подтверждается публикационной активностью в высокорейтинговых научных изданиях, а также организацией и проведением Институтом крупных международных конференций. Среди них — международная конференция по вычислительной аэроакустике с участием нескольких десятков виднейших зарубежных ученых, проводимая каждые два года в г. Светлогорске (Калининградская обл.), авторитетная конференция по компьютерной графике ГРАФИКОН.

Сильные международные позиции Института в области прикладной математики подтвердила победа России в 2021 году в конкурсе на проведение в 2024 году Конгресса ECCOMAS (крупнейшей международной организации в области прикладной математики) с числом участников порядка 3000 чел. По результатам тайного голосования был выбран Санкт-Петербург. К сожалению, позже это решение было отменено.



ISONscore — это совместный проект Управления по вопросам космического пространства ООН и Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН.

В рамках ISONscore планируется предоставление на конкурсной основе научным и образовательным организациям из развивающихся стран телескопов малого диаметра и сопутствующего оборудования. Таким образом у них появится возможность наблюдать спутники и космический мусор на высоких орбитах Земли, а также астероиды и кометы.





Фундаментом достижений Института является кадровый научный потенциал. В Институте работали крупные ученые, авторы выдающихся научных результатов, создавшие научные школы в различных областях математики, механики, физики, информатики, получившие широкое признание у нас в стране и за рубежом. Среди них такие корифеи, как Мстислав Всеволодович Келдыш, Андрей Николаевич Тихонов, Яков Борисович Зельдович, Александр Андреевич Самарский, Израиль Моисеевич Гельфанд, Сергей Константинович Годунов, Дмитрий Евгеньевич Охоцимский, Тимур Магомедович Энеев. Под руководством этих ученых были решены судьбоносные для нашей страны задачи и во многом на годы определены научные направления Института.

Сегодня их дело продолжают коллеги и ученики, добившиеся выдающихся результатов, получивших международное признание.

В настоящее время в Институте (включая филиал в Пущино) по штатному расписанию работают 668 человек, в том числе 353 научных сотрудника. В Институте работают 2 академика, 4 члена-корреспондента РАН, 89 докторов и 164 кандидата наук.

Мы особо ценим тот факт, что почти 30 % наших научных сотрудников, 103 человека — это молодые люди в возрасте до 39 лет. Молодежь активно включена в научную деятельность и достигает в ней важных результатов, свидетельством чего являются премии и награды, полученные нашими молодыми специалистами.

У нас всегда было уважительное отношение к ветеранам, людям, связавшим свою творческую деятельность, да и всю свою жизнь с Институтом.

Мы понимаем, что сила научного коллектива — в органическом сочетании, в сплаве знаний и опыта старшего поколения ученых с энергией и активностью молодежи.

Подводя итоги 70-летней деятельности Института и перефразируя команды, звучащие при запуске космических кораблей, мы говорим: **70 лет – полет нормальный!**

Научный руководитель
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, академик

/Б. Н. Четверушкин/



Москва 2023