

Математическое отделение ИТМФ на современном этапе развития

Р. М. ШАГАЛИЕВ

Сегодня мы отмечаем 70 лет с момента образования РФЯЦ-ВНИИЭФ, деятельность которого связана с созданием ядерного оружия, способного предотвратить нападение вероятного противника, дальнейшим его развитием для сохранения ядерного паритета, а также с научно-техническим обеспечением сохранения нашей страной статуса ядерной державы на долгие годы.

Обеспечение надежности и безопасности ядерного оружия, находящегося на вооружении и в серийном производстве, а также возможность его модернизации с обоснованием технических характеристик невозможны без применения методов численного моделирования сложных физических процессов, поскольку в лабораторных условиях нереально воспроизвести физические условия, реализующиеся при работе ядерных зарядов и боеприпасов. А натурные эксперименты, которые позволяли проверить истинность тех или иных физико-математических моделей, расчетов и конструкторских решений, а также давали множество новой информации о процессах, имеющих место при ядерном взрыве, в связи с положениями Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний не проводятся с начала 1990-х гг.

Отсчетной точкой формирования математического направления работ ныне существующего ИТМФ можно считать ноябрь 1948 г., когда к Я. Б. Зельдовичу прибыл из МИАН СССР М. М. Агрест, который возглавил созданную в теоретическом отделе № 50 небольшую расчетную группу, состоявшую в основном из лаборантов-вычислителей. Самостоятельный математический отдел (его возглавил Н. Н. Боголюбов) был создан 9 января 1951 г., позже преобразован в математический научно-исследовательский центр. И на протяжении своей более чем 60-летней истории математическое подразделение выполняет свои главные задачи – разработку математических методов, методик, алгоритмов, технологий моделирования для обеспечения расчетно-теоретического обоснования надежности и безопасности разрабатываемых ядерных зарядов и боеприпасов,

создание вычислительных систем и комплексов программ. Сегодня математическое отделение ИТМФ является крупнейшим в стране центром в области создания и применения программных комплексов инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования, а также проектирования и разработки высокопроизводительных вычислительных систем различного класса и назначения.

На протяжении всего существования математического отделения важнейшим направлением его работ является создание математических методик и комплексов программ моделирования физических процессов для решения задач механики сплошных сред, физики высоких плотностей энергии и др., входящих в тематику основной деятельности института. Большое внимание за последние годы было уделено созданию высокопараллельных математических методик и комплексов программ для численного моделирования в трехмерной постановке. Такие расчеты позволяют учитывать на разных стадиях работы ЯЗ эффекты, связанные с реальной трехмерностью элементов конструкций, что в некоторых случаях не удавалось сделать на основе двумерных расчетов. Особую важность проведения такого рода расчетов надо отметить при обосновании безопасности и надежности работы специзделий. Разработана и обоснована технология проведения таких расчетов на эйлеровых сетках. Выработаны требования к выбору физических моделей, уравнений состояния веществ, геометрическим размерам исходной сетки и другим параметрам, позволяющие с достаточной точностью описать основные характеристики протекающих процессов. Созданы методики и комплексы программ для проведения в 3-D геометрии сквозных расчетов в замкнутой постановке, в том числе с учетом турбулентного перемешивания и неравновесного горения газа. Разработаны «бессеточный» метод и программа связи с программой переноса частиц методом Монте-Карло, позволяющие проводить сложные трехмерные расчеты работы специзделий в сжатые сроки. Созданные комплексы программ являются уникальным

инструментом при проектировании новых и модернизации существующих ЯЗ, обосновании их надежности и ядерной взрывобезопасности в условиях ДВЗЯИ.

Созданы программы и разработана технология решения связанных задач гидродинамики и прочности с использованием комбинированных (регулярных и нерегулярных) сеток. Это позволило приступить к решению задач с значительной пространственной и геометрической разномасштабностью протекающих физических процессов. Разработаны и реализованы высокоэффективные алгоритмы распараллеливания, позволяющие проводить производственные расчеты на десятках тысяч вычислительных ядер, с использованием нескольких миллиардов счетных ячеек при описании расчетных моделей. Созданы программы общего сервиса, позволяющие единым образом задавать геометрию многомерных задач, рассчитывать начальные данные для всех программных комплексов, представлять результаты расчетов, а также обрабатывать и визуализировать эти данные. Выполнены работы по пополнению баз данных нейтронно-ядерных констант, уравнений состояния и пробегов фотонов, обеспечивающих расчеты по основной тематике ВНИИЭФ. Так, например, созданы широкодиапазонные уравнения состояний для основных конструкционных материалов, позволяющие проводить сквозные расчеты в замкнутой технологии без ручного вмешательства.

С появлением многоядерных вычислительных систем с принципиально новой архитектурой, базирующейся на специализированных вычислительных модулях, в математическом отделе широким фронтом ведутся работы по разработке математических методик и комплексов программ нового поколения. Для эффективного применения гетерогенных вычислительных систем были разработаны новые вычислительные алгоритмы и методы на качественно более высоком уровне параллелизма. В опытную эксплуатацию сданы первые комплексы программ, основанные на современных технологиях программирования и позволяющие использовать все мощности суперЭВМ современной архитектуры. В настоящее время в математическом отделе ИТМФ находится в эксплуатации более 50 программных комплексов собственной разработки, позволяющих проводить расчетное моделирование самых разнообразных классов задач с более полным учетом протекающих физических процессов, и обеспечивающих расчетно-теоретические работы по обоснованию работоспособности,

надежности и безопасности ядерных зарядов при их создании и модификации. Большой прогресс произошел в области создания и практической реализации новых технологий проведения массового производственного счета на многопроцессорных вычислительных системах двумерных и трехмерных задач. При этом согласованно сочетаются вопросы точности и надежности расчетов за счет комбинации различных подходов и полноты физической и математической постановок в части непрерывности и замкнутости проходящих физических процессов.

Помимо решения задач, связанных непосредственно с работой ЯЗ, в начале этого века все острее встали вопросы создания отечественных пакетов программ инженерного анализа и применения их при проектировании изделий и приборов специального назначения. При проведении таких работ необходимо моделировать большую совокупность физических процессов, таких как течения вязкой среды, теплоперенос, деформация конструкций, воспламенение и плавление веществ и т. д. Использование имеющихся в мире коммерческих кодов связано с определенными трудностями, в первую очередь, с запретом со стороны разработчика применения их в интересах ЯОК, а также с высокой стоимостью приобретения и продления лицензий. Вопрос создания отечественных пакетов программ решения задач инженерного анализа поднимался на научно-техническом совете ВНИИЭФ, где была отмечена потребность в разработках такого рода как во ВНИИЭФ, так и во многих отраслях промышленности, в частности, при проектировании реакторов, моторов, турбин, в автомобильной промышленности, авиастроении и т. п.

По инициативе Р. М. Шагалиева и Ю. Н. Дерюгина в 2005 г. был создан коллектив, который приступил к активным работам по разработке и созданию конкурентоспособного отечественного пакета программ для инженерного анализа. В конце 2007 г. создана и сдана в эксплуатацию первая версия пакета программ для расчета в параллельном режиме связанных задач теплопереноса и деформации конструкций при квазистатических и динамических нагрузках. Ускоренное и масштабное развитие этих работ началось после заседания Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России, состоявшегося 22 июля 2009 г. в г. Сарове. В 2010–2012 гг. указанные работы велись в рамках проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», утвержденного на заседа-

нии Комиссии. Работа над проектом была организована в широкой кооперации, объединившей более 40 соисполнителей. В их число вошли ведущие предприятия атомной энергетики, авиастроения, автомобилестроения, ракетно-космической отрасли; организации Российской академии наук; Минобрнауки; коммерческие IT-компании. В результате совместных усилий все работы, запланированные на 2010–2012 гг. картой проекта, были выполнены в полном объеме, с превышением плановых значений по ряду ключевых индикаторов.

В кооперации с партнерами по проекту коллектив сотрудников ИТМФ создал базовые версии следующих отечественных пакетов программ 3D имитационного моделирования:

- ЛОГОС-CFD (Ю. Н. Дерюгин, А. С. Козелков и др.) для расчета 3D задач теплопереноса и аэро-, гидро-, газодинамики. Он предназначен для расчета стационарных и нестационарных течений вязкого газа, ламинарных и турбулентных течений, несжимаемых и сжимаемых течений; вязких течений с учетом конвективного теплообмена, течений в пористой среде; теплопереноса; деформирования конструкций при статических нагрузках. Области применения: атомная энергетика, нефтегазовая отрасль, авиакосмическая отрасль, автомобилестроение и т. д.;

- ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ (В. Ф. Спиридонов, К. В. Циберев и др.) для моделирования быстропротекающих процессов аэро-, гидро-, газодинамики и прочности на основе метода конечных элементов. Области применения: атомная энергетика, нефтегазовая отрасль, авиакосмическая отрасль, автомобилестроение и т. д.;

- ДАНКО+ГЕПАРД (А. И. Абакумов и др.) для 3D расчетов прочности конструкций при статических и динамических термосиловых нагрузках с учетом больших пластических деформаций. Моделируемые физические процессы: упругопластическое поведение материала в рамках механики сплошной среды с высоким уровнем пластического деформирования, контактное взаимодействие объектов с учетом трения, разрушение, квазистатическое и динамическое нагружения. Область применения: численное исследование поведения строительных конструкций АЭС, корпусов реакторов и элементов реакторного оборудования при действии статических и динамических нагрузок, включая условия аварийных ситуаций;

- НИМФА (В. В. Горев, И. В. Горев, О. И. Бутнев, Ю. Н. Дерюгин и др.) для имитационного

моделирования процессов фильтрации и тепло-массопереноса в подземном пространстве со сложной геологической структурой на много-процессорных ЭВМ. Области применения: нефтегазовая отрасль, атомная энергетика, экологическая безопасность и т. д.

Все созданные пакеты программ прошли процедуру государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, а также сертифицированы по системе сертификации ГОСТ. Программы направлены на решение задач инженерного анализа в высокотехнологичных отраслях промышленности и стали первым серьезным шагом на пути обеспечения конкурентоспособности отечественного прикладного программного обеспечения с коммерческими зарубежными продуктами. Высокий уровень распараллеливания (до 100 тысяч ядер) позволяет получать ускорение расчетов в десятки тысяч раз и превосходит ряд лучших мировых аналогов.

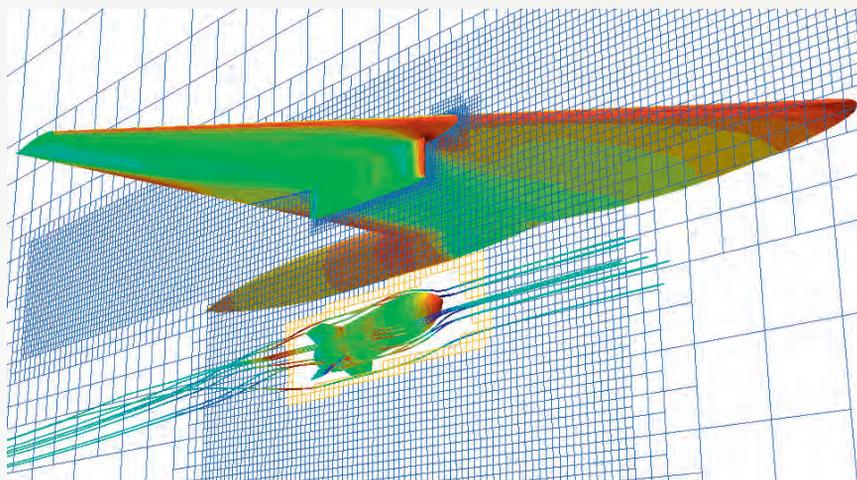
Ключевую роль в иницировании, продвижении и реализации проекта сыграл директор РФЯЦ-ВНИИЭФ В. Е. Костюков, научным руководителем работ выступал директор НИИСИ РАН академик В. Б. Бетелин. Создание высокопроизводительного вычислительного комплекса нового поколения, разработка отечественных пакетов программ 3D имитационного моделирования, внедрение разработанных пакетов программ и компьютерных моделей на предприятиях авиастроения, автомобилестроения, атомной энергетики и ракетно-космической отрасли проводились под руководством первого заместителя директора ИТМФ, начальника математического отделения Р. М. Шагалиева.

В ходе реализации проекта достигнуты крупные практические результаты, решена важнейшая задача государственного масштаба, направленная на обеспечение конкурентоспособности отечественного ОПК и гражданских отраслей. Итогом реализованного проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» явилось создание основы для массового использования отечественных суперкомпьютерных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности РФ.

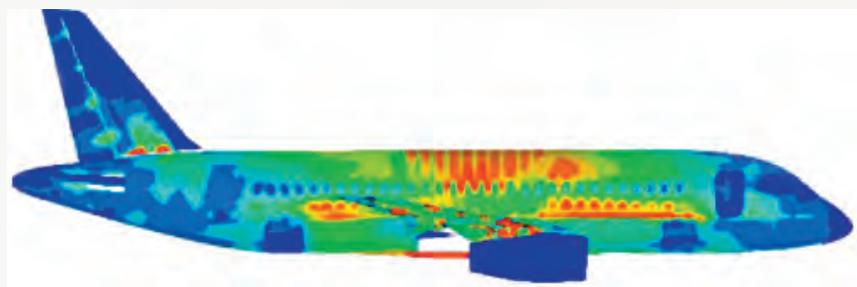
После завершения проекта основным направлением работ стало наращивание функционала разработанных программ, их верификация и валидация, а также внедрение созданного ПО в работы выделенных предприятий базовых отраслей промышленности. Так, в рамках со-

вместных работ с ОАО «ОКБ Сухого» и НПО «Сатурн» проводилось внедрение пакета программ ЛОГОС в производственную деятельность предприятий авиационной промышленности. Решен ряд практических задач, наиболее важной из которых является обоснование безопасности самолета при аварийной посадке с невыпущенными шасси. Результат работы – создана технология обоснования безопасности при аварийной посадке, направленная на сокращение числа экспериментов и сроков проектирования; подтверждена работоспособность пакета программ ЛОГОС при проведении расчетных исследований лайнера SSJ-100, получено согласие с расчетами по зарубежным пакетам программ. В настоящее время совместно с «ОКБ Сухого» разработана и успешно реализуется программа поэтапного импортозамещения пакетом ЛОГОС зарубежных разработок для выделенных классов задач. Планируется заместить в 2015 г. – 25 %, 2016 – 40 %, 2017 – 70 %.

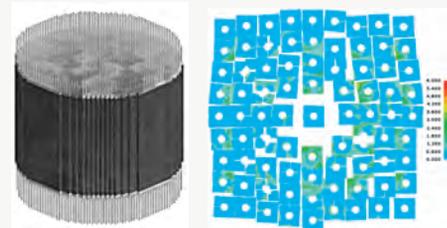
В рамках совместных работ с АО «Атомпроект», АО «ОКБМ им. Африкантова», АО «ОКБ "Гидропресс"» и др. проводится внедрение пакета программ ЛОГОС в производственную деятельность предприятий атомной энергетики. Одной из наиболее крупных решенных задач является обоснование безопасности эксплуатации и ресурсных характеристик энергоблоков РБМК для продления сроков эксплуатации: по пакету программ ЛОГОС расчетно исследована работоспособность реактора РБМК-1000 (энергоблок № 1 ЛАЭС) до и после восстановительно-ремонтных работ. Результаты легли в документ обоснования безопасности пуска энергоблока после восстановительно-ремонтных работ, энергоблок запущен в эксплуатацию на 100 % мощности. В настоящее время для атомной энергетики ЛОГОС наиболее активно развивается в интересах моделирования течения жидкометалличе-



Отделение подвесного груза от крыла с пилоном



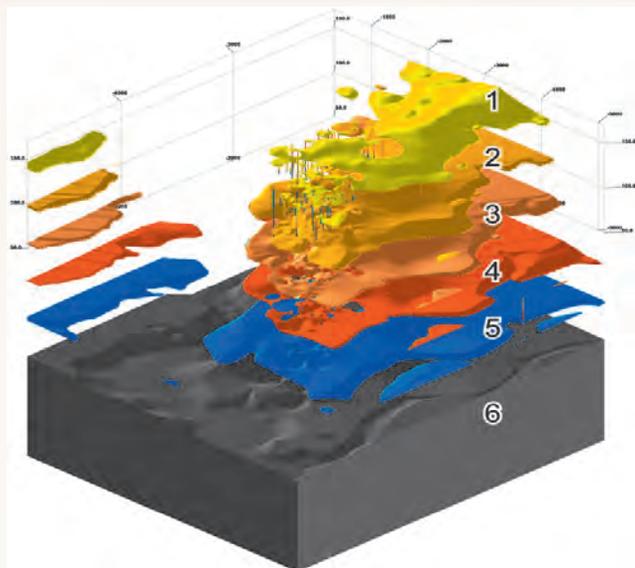
Расчетное обоснование безопасности посадки SSJ-100 с невыпущенными шасси



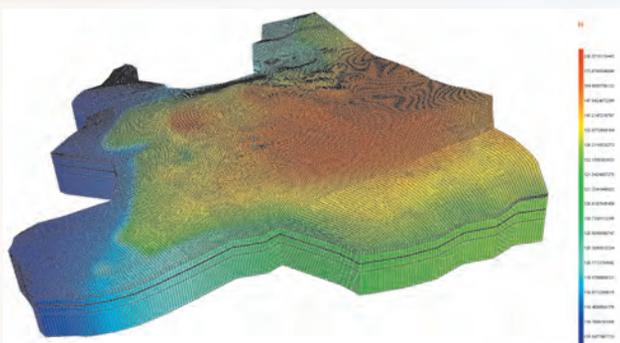
Расчет прочностных характеристик активной зоны 1-го энергоблока ЛАЭС-1

ских теплоносителей в реакторах 4-го поколения на быстрых нейтронах.

Еще одним активно развиваемым пакетом программ для широкого применения при решении вопросов экологической безопасности, нефте- и газодобычи является пакет программ НИМФА, моделирующий многофазные, многокомпонентные течения жидкости и газа в грунтовых породах. В 2015 г. в пакете НИМФА реализован блок решения неизотермических задач плотностной конвекции в подземных потоках. Так, например, средствами пакета НИМФА создана модель площадки № 6 ФГУП «РФЯЦ-



Трехмерная геологическая модель района площадок № 6 и 14



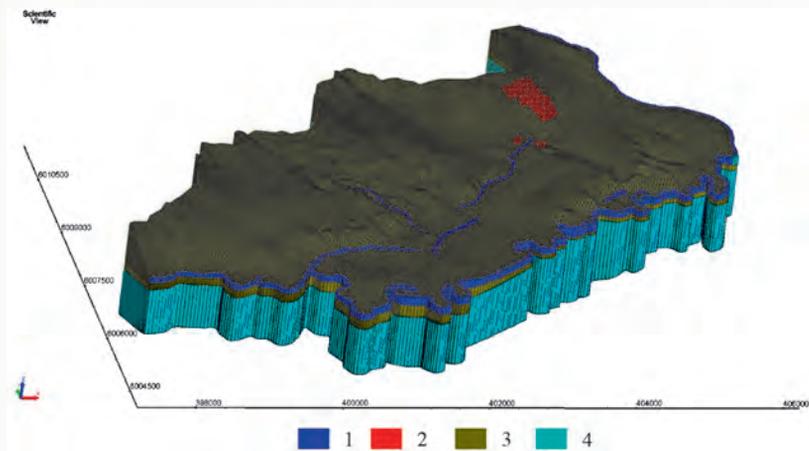
Трехмерная расчетная модель площадок № 6 и 14, расчетное поле напоров

ВНИИЭФ». Модель характеризуют резкое различие фильтрационных свойств в смежных пластах (изменение коэффициента фильтрации на 3–4 порядка), сложная геометрия слоев с изменением мощностей в пределах модели на 2 порядка и наличием фильтрационных окон в слабопроницаемых слоях. Проведена серия кросс-верификационных расчетов по коммерческому коду и ПК НИМФА. Получено хорошее совпадение полей напоров, расхождения по балансам составляют менее 1 %, разность средних значений напоров по пластам не превышает 0,25 %.

Разработана модель водозабора № 3 ОАО «ГНЦ "НИИАР"», проведены верификационные расчеты. В процессе верификации выпол-

нена адаптация расчетного алгоритма к задачам геофильтрации в сложнопостроенной слоистой геологической среде. Кроме того, в пакете НИМФА реализованы модель линейных дрен, модель эвапотранспирации грунтовых вод, блок подсчета балансов геофильтрационных потоков, в том числе баланса по произвольному фрагменту модели. Также реализован блок решения неизо термических задач плотностной конвекции в подземных потоках. Решены тестовые задачи, проведено сравнение с экспериментальными данными и результатами, полученными по коммерческим кодам. На известной задаче Шинкариола – Шварца показано, что процесс плотностной конвекции НИМФА моделирует результаты ближе к эксперименту, чем коммерческие коды. На тестовой задаче по термоконвекции показано хорошее совпадение результатов ПК НИМФА с результатами лучших коммерческих кодов.

Создана версия пакета НИМФА, адаптированная и верифицированная в части решения задач многофазной фильтрации флюидов при нефтедобыче. В пакете программ НИМФА реализована возможность проведения расчетов с использованием сотен вычислительных процессоров, что позволяет радикально сократить время калибровки сложных моделей и проводить расчеты моделей размерами в сотни квадратных километров, что невозможно с использованием современных зарубежных коммерческих кодов. Разработаны программы, позволяющие моделировать процессы однофазной, двухфазной и трехфазной фильтрации, в том числе с использованием модели двойной пористости для двухфазной фильтрации.



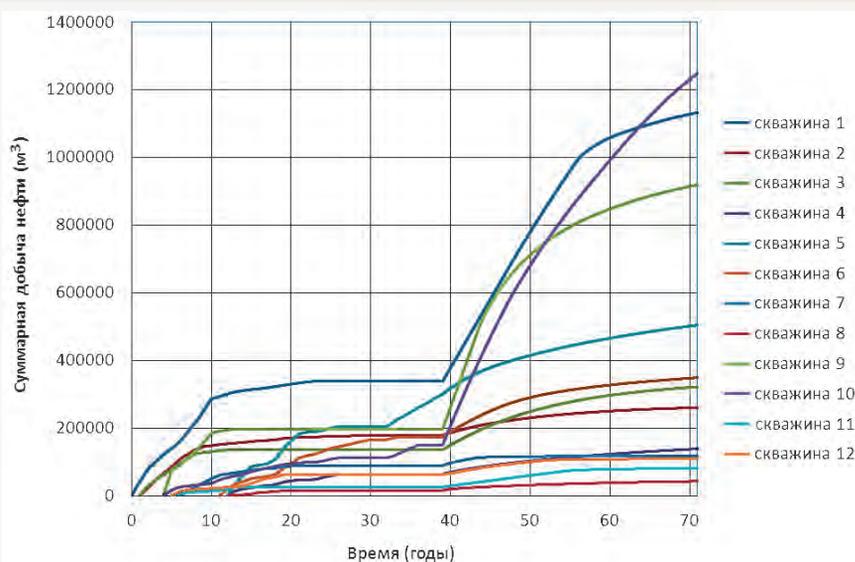
Трехмерная расчетная модель водозабора № 3: 1 – реки; 2 – источники загрязнения; 3 – отложения; 4 – водоносный горизонт

Проведена верификация кода на примере реального месторождения с историей разработки в фонтанирующем режиме с 1969 по 2007 г., сделан прогноз нефтедобычи в напорном режиме на период до 2040 г.

В интересах атомной энергетики в ИТМФ в последнее десятилетие разработана и развивается программа TDMCC. Она предназначена для решения широкого класса нейтронно-физических задач методом Монте-Карло. TDMCC – многоцелевая программа, с помощью которой можно решать задачи оценки критичности и ядерной безопасности активных зон реакторных установок, оценивать радиационную безопасность и рассчитывать защиту от излучений, решать задачи подбора параметров для получения заданного значения эффективного коэффициента размножения нейтронов, а также проводить расчеты выгорания топлива и моделировать топливные циклы реакторных установок. TDMCC относится к классу прецизионных программ, позволяющих проводить расчеты без использования приближений по геометрии и по описанию процессов взаимодействия частиц с веществом. Программа TDMCC ориентирована на проведение расчетов на многопроцессорных машинах и персональных компьютерах и является отчуждаемым программным продуктом. Программа передана в различные внешние организации для использования как в коммерческих целях, так и для проведения методических расчетов. Основными пользователями программы TDMCC являются АТОМПРОЕКТ (г. С.-Петербург), Атомэнергопроект (г. Москва), ОКБ «Гидропресс» (г. Подольск), ФЭИ (г. Обнинск) и другие. Специалистами ИТМФ проводятся консультации по подготовке задач и проведению расчетов. Все это способствует повышению степени использования программы TDMCC в работах по обоснованию ядерной и радиационной безопасности реакторных установок в процессе их эксплуатации.

В 2013–2014 гг. совместно с внешними организациями была проведена работа по верификации программы TDMCC в нескольких направлениях:

- в обоснование ядерной безопасности активных зон реакторов, устройств локализации



История и прогноз суммарной добычи нефти по каждой из 12 скважин

расплава, бассейнов выдержки, мест хранения свежего и отработанного топлива, транспортных упаковочных комплектов для перевозки топлива и других средств обращения с топливом на АЭС с ВВЭР;

- для решения задач обоснования проекта РУ СВБР-100;

- для использования модуля расчета радиационных полей, входящего в состав программно-технического комплекса, разрабатываемого сотрудниками ИБРАЭ и предназначенного для анализа и обоснования ядерной, радиационной и экологической безопасности объектов ядерного наследия на стадиях подготовки и вывода из эксплуатации.

В 2014 г. два верификационных отчета «В обоснование ядерной безопасности хранилищ ядерного топлива ВВЭР» и «Для решения задач обоснования проекта с РУ СВБР-100» приняты к аттестации в НТЦ ЯРБ.

Одновременно с созданием ПО проект «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» (2010–2012 гг.) придал мощный импульс развитию высокопроизводительных вычислительных систем. В 2011 г. создана и сдана в эксплуатацию вычислительная система мирового уровня, часть вычислительных ресурсов которой предоставлена предприятиям РФ для проведения расчетов в удаленном режиме. Большой вклад в ее создание внесли А. А. Холостов, Г. А. Поповиченко, В. А. Свиридов, Н. Н. Залялов, А. М. Варгин, Г. П. Семенов, Д. В. Кульнев.

Под руководством Р. М. Шагалиева началось развитие ряда компактных суперЭВМ (КС-ЭВМ)

	КС-ЭВМ малого класса	КС-ЭВМ среднего класса
1 кв*10	Проект «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий»	
2 кв*10	АПК-1 AMD Opteron 6100 1,1 Тфлоп/с 1,5 Тбайт ОЗУ 24 Тбайт HDD 2,5 кВт 48 дБА 60 кг	
2 кв*11		АПК-3 AMD Opteron 6200 3,22 Тфлоп/с 3 Тбайт ОЗУ 108 Тбайт HDD 5 кВт 50 дБА 135 кг
3 кв*11	АПК-1М AMD Opteron 6200 1,08 Тфлоп/с 1 Тбайт ОЗУ 35 Тбайт HDD 2,2 кВт 48 дБА 58 кг	
2 кв*12	Дальнейшее развитие ряда КС-ЭВМ	
1 кв*13		АПК-5 AMD/Intel 5,5 Тфлоп/с 4 Тбайт ОЗУ 108 Тбайт HDD 7,7 кВт 69 дБА 230 кг
4 кв*13	АПК-1М2 AMD Opteron 6300 1,22 Тфлоп/с 2 Тбайт ОЗУ 32 Тбайт HDD 1,9 кВт 50 дБА 57 кг	
2 кв*14	АПК-1М3-AMD AMD Opteron 6300 1,22 Тфлоп/с 2 Тбайт ОЗУ 32 Тбайт HDD 1,9/1,4 кВт 50 дБА 59 кг	АПК-1М3-Intel Intel Xeon 4600 1,33 Тфлоп/с 2 Тбайт ОЗУ 32 Тбайт HDD 1,9/1,4 кВт 50 дБА 59 кг

Основные модели КС-ЭВМ разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

для оснащения предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности РФ недорогими высокопроизводительными вычислительными средствами и прикладным программным обеспечением инженерного анализа. КС-ЭВМ представляют собой многофункциональные высокопроизводительные вычислительные машины производительностью от 1 до 5 Тфлоп/с (триллионов операций с плавающей точкой в секунду), предназначенные для численного имитационного моделирования. На сегодняшний день разработано 14 различных модификаций КС-ЭВМ:

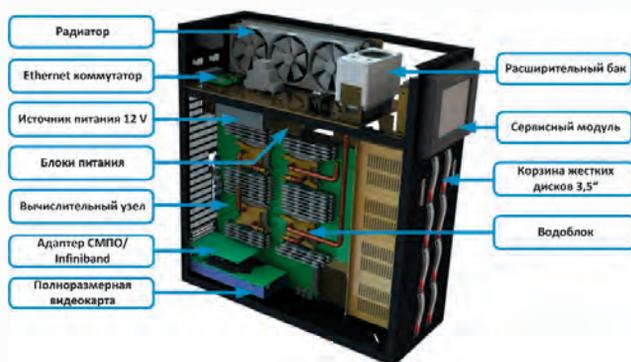
- 4 модификации КС-ЭВМ производительностью не менее 1 Тфлоп/с;
- 3 модификации производительностью не менее 3 Тфлоп/с;
- 7 модификаций производительностью не менее 5 Тфлоп/с.

Отличительной особенностью КС-ЭВМ являются уникальные технические решения, обеспечивающие возможность эксплуатации непосредственно на рабочем месте пользователя в помещении, не оборудованном специальными системами жизнеобеспечения (кондиционирования, пожаротушения и электропитания). Это потребовало обеспечить расширение температурного диапазона эксплуатации КС-ЭВМ (до 35 °С) и снижения уровня акустического шума (менее 50 дБА). В состав КС-ЭВМ входят все функциональные блоки и подсистемы, характерные для «больших» суперЭВМ. Архитектура КС-ЭВМ базируется на выборе оптимальных технических

характеристик, выработанных на основе многолетнего опыта развития суперкомпьютерных технологий в ИТМФ, и удовлетворяет основным техническим требованиям к типу и производительности микропроцессоров, пропускной способности коммуникационной среды, объему оперативной памяти и подсистем хранения данных, составу системного и прикладного программного обеспечения. КС-ЭВМ поставляются в комплекте с программными пакетами инженерного анализа разработки ИТМФ. К началу 2015 г. уровень внедрения КС-ЭВМ – более 100 образцов на 40 предприятиях и научных организациях РФ, суммарная производительность которых превышает 200 Тфлоп/с. К пользователям КС-ЭВМ относятся предприятия ГК «Росатом», авиакосмической и автомобильной отраслей, организации РАН, высшие учебные заведения, Министерство обороны РФ, нефтегазовая отрасль и предприятия авиастроения.

Большой вклад в создание и совершенствование КС-ЭВМ внесли В. Н. Стрюков, А. В. Шатохин, Ю. Н. Корзаков, А. Н. Петрик, В. Н. Лашманов, Н. А. Дмитриев, А. И. Чайка, Д. Р. Ярулин, А. Г. Селякин, И. П. Осинин, А. Ю. Ушаков, С. Н. Шлыков и др.

Одним из направлений дальнейшего развития АПК пятой серии является использование в его конструкции технологии автономного жизнеобеспечения или, другими словами, технологии «все в одном», когда в едином корпусе размеще-



Компоновка подсистем КС-ЭВМ на примере модели АПК-1М2

ны собственно вычислительная система, системы охлаждения, бесперебойного электропитания и пожаротушения. Это позволяет совместить достаточно высокую производительность и компактное исполнение как ИТ-оборудования, так и инженерных систем, необходимых для его функционирования. Использование данной технологии обеспечивает повышенную защиту информации и оборудования от внешних воздействий и физических угроз, гибкость конфигураций под различные требования заказчика, комфортные условия работы пользователей (в случае нахождения их в одном помещении) и пр. Одной из ключевых особенностей технологии «все в одном», применяемой в АПК-5, является возможность масштабирования, например, до 50 Тфлоп/с, что было использовано при проектировании и создании совместно с ООО «ЦКО» уникальной вычислительной системы КАСКАД в технопарке п. Сатис Нижегородской области.

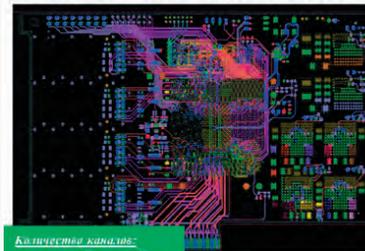
Имеющийся научно-технический задел математического отделения ИТМФ в настоящее время успешно реализуется также в направлении создания суперЭВМ среднего класса производительности по заказам предприятий (МО РФ, ВНИИА, НИЦ РКП, ВНИПИЭТ, ГНЦ РФ ФЭИ, ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «ОКБ Сухого» и др.). Данное направление также стабильно развивается. В настоящее время РФЯЦ-ВНИИЭФ проектирует и создает суперЭВМ для решения задач МО РФ, ОАО «ГосМКБ "Радуга" им. А. Я. Березняка», ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"», НТ «Рубин» и других.

Ключевой компонентой вычислительных систем является коммуникационная среда – система межпроцессорных обменов (СМПО), производительность которой существенно влияет на характеристики системы в целом. В математическом отделении ИТМФ ведется разработка СМПО. В настоящее время на базе ПЛИС реализована система СМПО-10G с двухуровневой коммутацией, ориентированная как на малые вычислительные системы, так и на системы ре-

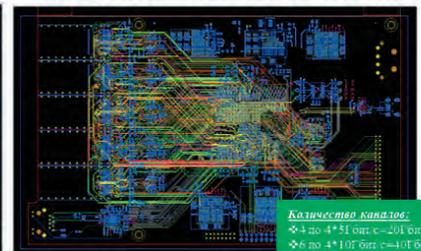


Адаптерный блок СМПО-10GA-AD2

Коммутаторный блок СМПО-10GA-SW



Количество каналов:
♦ 4 до 4*51 Гбит/с=408 Гбит/с



Количество каналов:
♦ 4 до 4*51 Гбит/с=408 Гбит/с
♦ 6 до 4*108 Гбит/с=408 Гбит/с

Характеристики МПП СМПО-10GA-1

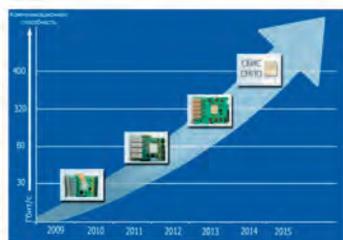
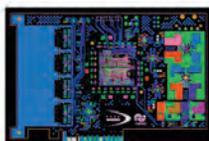
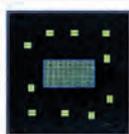
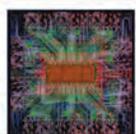
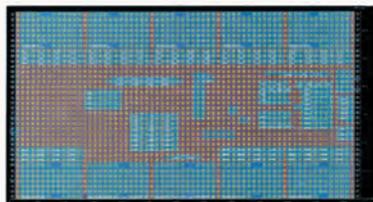
Параметр	Адаптерный блок СМПО-10GA-AD	Адаптерный блок СМПО-10GA-AD2	Коммутаторный блок СМПО-10GA-SW
Размер платы, мм	167,65 x 111,15		236 x 140
Толщина платы, мм	1,55		2,7±0,3
Общее количество слоев	18	20	28
Количество сигнальных слоев	6 (из них 4 – под диф. пары)	8 (из них 4 – под диф. пары)	12 (из них 8 – под диф. пары)
Тип материала диэлектрика	Высокочастотный		
Класс точности	S		
Волновое сопротивление дифференциальных пар	85 Ом±10%, 100 Ом±10%		(100 Ом±10%)

кордной производительности, эффективно обеспечивающая принципы передачи сообщений для обмена данными между вычислительными процессами. Для реализации этих принципов аппаратная составляющая системы реализована в виде двух блоков: адаптерного СМПО-10GA-AD и коммутаторного СМПО-10GA-SW.

Системы малой производительности могут строиться с использованием только адаптерных блоков по топологии 2D-тор. При этом суммарная производительность каналов связи вычислительного узла с коммуникационной сетью составляет 80 Гбит/с. Большие системы строятся по уникальной масштабируемой высоконадежной гибридной топологии мульти-тор с использованием адаптерного и коммутаторного блоков. Такая топология позволяет существенно повысить пропускную способность каналов связи. Проведенная работа включала разработку логических блоков для ПЛИС в виде RTL описания

Планируемые технические характеристики

- Коммуникационная задержка (MPI) – 1 мкс
- Пропускная способность (MPI) – 4 Гбайт/с
- Интерфейс с вычислительным узлом – PCI-Express 3.0
- Габаритные размеры: 30x30
- Технологические нормы: 65 нм
- Тип корпуса: BGA898
- Энергопотребление 20 Вт



на языке VHDL, самих электронных устройств, обеспечивающих передачу данных с производительностью до 40 Гбит/с, стека программного обеспечения. Разработанные многослойные печатные платы (МПП) обеспечивают передачу без искажений высокоскоростных сигналов (до 10 ГГц).

Разработанный стек программного обеспечения СМПО включает следующие основные программные компоненты:

- стек аппаратно-ориентированного программного обеспечения;
- библиотеку межпроцессорных обменов MPI.

На базе системы СМПО-10G создан вычислительный комплекс МП-СМПО-3D с топологией связи вычислительных узлов мульти-тор. Комплекс прошел испытания и показал правильность заложенных в программное обеспечение и аппаратную логику инженерных решений. Решения, выработанные в процессе разработки системы СМПО-10G, легли в основу создания кристалла СВИС-СМПО. Кристалл объединяет в себе функционал адаптерного и коммутаторного блоков, содержит в себе коммутатор высокоскоростных каналов, контроллер PCI Express 3.0, логику управления обменами, десять последо-

вательных портов с производительностью 40 Гбит/с каждый. Изготовленные макетные и опытные образцы кристаллов продемонстрировали работоспособность заложенной в них логики и производительность интерфейсов. В 2015 г. будут изготовлены адаптерные и коммутаторные блоки на базе СВИС СМПО 1890ВГ19А.

Еще одной успешно решенной в последние годы задачей является создание межотраслевого вычислительного центра коллективного пользования. На базе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» создан и активно функционирует один из крупнейших в стране вычислительный центр коллективного пользования (ВЦКП), оснащенный рядом суперЭВМ собственной разработки, в том числе мирового уровня. На основе технологии удаленных вычислений на суперЭВМ, разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ (в том числе и в защищенном исполнении), уже проводят наукоемкие расчеты около 50-ти предприятий и организаций РФ (ОАО «ОКБ Сухого», ОАО «ОКБМ Африкантов», «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ОАО «ГИ ВНИПИЭТ», ОАО «ОКБ "Гидропресс"» и др.). Предоставленные вычислительные ресурсы ВЦКП активно используются в круглосуточном режиме.

Сегодня уровень развития отечественных суперкомпьютерных технологий является важнейшим фактором, определяющим темпы развития и конкурентоспособность высокотехнологичных отраслей промышленности и страны в целом. Поэтому задача дальнейшего развития и внедрения отечественной промышленной технологии проектирования и отработки перспективной продукции, опирающейся на суперкомпьютерное моделирование, для нашего ядерного центра продолжает оставаться одной из наиболее приоритетных.

ШАГАЛИЕВ Рашит Мирзагалиевич – первый зам. директора ИТМФ, начальник научно-исследовательского отделения, доктор физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства РФ, кавалер ордена Почета