

# Развитие суперкомпьютерного моделирования в РФЯЦ-ВНИИЭФ

Р. М. ШАГАЛИЕВ, А. В. СМОЛЯКОВА, С. П. ЕГОРШИН

## Введение

Процесс создания новых промышленных систем и изделий во все времена являлся чрезвычайно сложным, длительным и, как следствие – дорогостоящим и энергоресурсозатратным.

Традиционный подход к созданию новых образцов технических систем и изделий всех предыдущих столетий цивилизации был основан на тщательной экспериментальной отработке новых решений с использованием натуральных образцов и экспериментов.

Однако, со стремительным усложнением создаваемых технических систем и изделий, традиционный подход стал все более и более тормозить динамику прогресса. Основная причина – значительное возрастание стоимости создаваемых сложных технических систем и изделий из-за большого числа расходуемых натуральных образцов и экспериментов на их доводку. Более того, в ряде случаев проведение натуральных испытаний в необходимом объеме по временным, техническим, финансовым, политическим и иным причинам стало уже просто невозможным (например, при создании новых образцов оружия сдерживания).

Вот почему высокоразвитые страны с конца 70-х – начала 80-х гг. XX века стали переходить на новый подход в создании конкурентоспособных высокотехнологичных промышленных систем и изделий.

В новом подходе в процессе проектирования перспективных образцов технических систем и изделий упор был сделан на использовании суперкомпьютерного моделирования – совокупности методов математического моделирования и вычислительных экспериментов.

Нельзя сказать, что специалисты СССР стояли в стороне от мировых тенденций. Они их отслеживали и были в курсе дела. В сравнении с западными наработками наиболее слабым звеном у нас на тот момент было отставание по части производительности вычислительной техники. Действительно, большим достижением в целом для нашей страны стала возможность

организации в 1975 г. в математическом отделении 08 ВНИИЭФ системы параллельных вычислений на объединенном вычислительном комплексе БЭСМ-6 с общей дисковой памятью. Это позволило довести вычислительную производительность системы до 2–2,5 мегафлопс. Хотя суперкомпьютер CDC-7600, спроектированный в США знаменитым разработчиком Сеймуром Креем, в 1975 г. уже имел производительность около 40 мегафлопс. В развернутой форме записи это всего лишь 40 000 000 операций в секунду. По данным И. Д. Софронова (на тот момент руководителя математического отделения ВНИИЭФ), который вместе с коллегами провел оценку параметров вычислительной машины, предназначенной для решения задач механики сплошной среды, для моделирования трехмерных течений требовались ЭВМ с производительностью не менее  $10^{13}$  арифметических операций в секунду! Что в то время было невыполнимо.

В первой половине 1980-х гг. российские ЭВМ уже на два порядка отставали по производительности от самого мощного эксплуатируемого в США суперкомпьютера. Планка в 1 миллиард флопс (1 гигафлопс) в США была преодолена суперкомпьютером NEC SX-2 в 1983 г. с результатом 1,3 гигафлопс. А у нас в отделении тогда лучшей была система «Эльбрус 1К2 (СВС)» с производительностью 3 мегафлопс (всего в 3 раза лучшей, чем у БЭСМ-6, «старушки» 1967 года выпуска). Но самым неприятным было то, что наша страна уже отставала по использованию суперкомпьютеров в промышленности, наверное, раз в 1000 (то есть на 3 порядка)!

Оценив сложившуюся ситуацию, АН СССР в 1984 г. создала под руководством академика А. А. Самарского совместно с Государственным комитетом науки и техники (ГКНТ) СССР рабочую научно-техническую комиссию по сбору предложений для формирования общегосударственной программы (ОГП) развития вычислительной техники в СССР.

В числе наиболее заинтересованных лиц активное участие в подготовке указанных предло-

жений принимали и специалисты математического отделения ВНИИЭФ во главе с И. Д. Софроновым.

В результате проведенной работы Временной научно-технической комиссией ГКНТ СССР и АН СССР было собрано порядка 20 томов предложений для будущей общегосударственной программы развития вычислительной техники в СССР.

Проект концепции ОГП был рассмотрен на состоявшемся 13 ноября 1986 г. заседании ЦК КПСС и Совета Министров СССР. Там было отмечено, что математическое моделирование и вычислительный эксперимент являются новым мощным средством быстрого и качественного решения фундаментальных и прикладных задач современной науки и техники, поэтому ОГП надо развить до уровня целевой комплексной программы СССР. Концепция была отправлена на доработку в министерства и ведомства.

13 мая 1987 г. состоялось совещание представителей министерств и ведомств по обсуждению хода подготовки проекта концепции ОГП. Были заслушаны доклады академика А. А. Самарского и его заместителя В. Ф. Тишкина о ходе подготовки проекта ОГП по широкому применению методов математического моделирования в различных отраслях народного хозяйства на период до 2000 г. Прошли активные прения, в которых среди выступавших были заместитель министра высшего и среднего образования И. М. Макаров, заместитель директора ИАЭ им. И. В. Курчатова Г. А. Салтанов, ректор Горьковского госуниверситета А. Г. Угодчиков, член совета АН СССР по искусственному интеллекту В. А. Ириков, заместитель директора Института кибернетики АН УССР И. Н. Молчанов и др. Важно отметить, что в данном совещании также принимали участие приглашенные специалисты в области прикладной вычислительной математики и вычислительных систем. В том числе – И. Д. Софронов, начальник математического отделения 08 ВНИИЭФ.

К сожалению (из-за последовавшего с 1988 г. периода постепенного распада СССР и смены общественной формации), работа по утверждению ОГП была остановлена. ГКНТ СССР и АН СССР прекратили свое существование.

## Революционное решение

Видя, что процесс распада СССР не позволит в среднесрочной перспективе приступить к созданию централизованных условий для разработки супер-ЭВМ и последующего внедрения

суперкомпьютерного моделирования в масштабах всей страны, И. Д. Софронов принял неожиданное решение – организовать разработку высокопроизводительных вычислительных систем с массовым параллелизмом своими силами. Ему удалось убедить руководство ВНИИЭФ в том, что отсутствие таких систем стало сдерживающим фактором в развертывании работ по повышению точности двумерных расчетов по основной тематике ВНИИЭФ, тормозило расширение работ по созданию новых математических методик расчета задач в многомерной постановке, затягивало внедрение в производственный счет менее авостных технологий счета и т. д.

Выдвигая свое предложение, И. Д. Софронов опирался на знания и умения сотрудников своего трудового коллектива – специалистов не только в области прикладной вычислительной математики. К тому времени в математическом отделении уже сформировался уникальный по компетенции коллектив специалистов по вычислительной технике, успешно занимавшийся усовершенствованием имеющейся в стране и поступавшей в отделение передовой вычислительной техники.

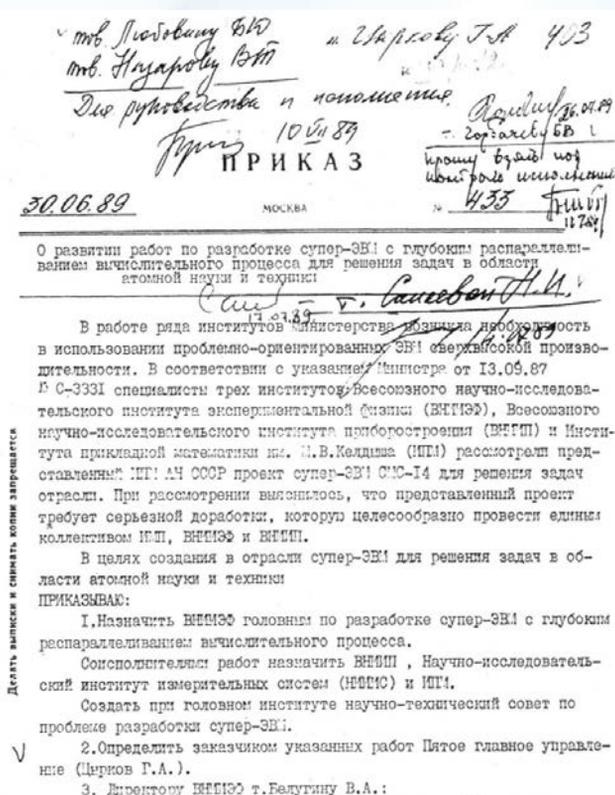


Рис. 1. Фрагмент приказа министра МСМ от 30.06.1989 г. № 433 «О развитии работ по разработке супер-ЭВМ с глубоким распараллеливанием вычислительного процесса для решения задач в области атомной науки и техники»

Именно это обусловило возможность принятия И. Д. Софроновым в сложный период конца 1980-х гг., когда возможности в области проектирования и производства микроэлектроники у отечественных производителей сильно ослабли, революционного решения о переходе к проектированию и созданию супер-ЭВМ.

Предложение И. Д. Софронова поддержало не только руководство предприятия, но и Министерство среднего машиностроения (МСМ) в лице министра Л. Д. Рябева и главного инженера МСМ Б. Ю. Любовина. 30 июня 1989 г. Л. Д. Рябев подписал приказ № 433 «О развитии работ по разработке супер-ЭВМ с глубоким распараллеливанием вычислительного процесса для решения задач в области атомной науки и техники» (рис. 1).

Этим приказом головным предприятием по разработке супер-ЭВМ с глубоким распараллеливанием вычислительного процесса был определен ВНИИЭФ. В соответствии с п. 3 указанного приказа в IV квартале 1989 г. в математическом отделении ВНИИЭФ для создания супер-ЭВМ было организовано специальное подразделение.

В 1993 г. сотрудники этого подразделения создали вычислительный модуль, который лег в основу разработанной затем первой 8-процессорной машины МП-3 гигафлопсной производительности ( $10^9$  операций в секунду).

Хотя по своей вычислительной производительности МП-3 достигла уровня, преодоленного в США суперкомпьютером NEC SX-2 еще 10 лет назад, опыт ее разработки позволил специалистам математического отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ достаточно быстро создать целый ряд все более и более производительных мультипроцессорных супер-ЭВМ. Среди таких машин можно выделить построенную в 2001 г. супер-ЭВМ МП-10 терафлопсного класса, правда с использованием части импортных компонентов. Учитывая, что барьер производительности в 1 триллион операций (Тфлопс) впервые перешагнул суперкомпьютер ASCI Red в США в 1996 г., в 2001 г. общее отставание создаваемых в математическом отделении ИТМФ супер-ЭВМ по вычислительной мощности от лучших мировых образцов сократилось до 5 лет.

### **Развитие вычислительной базы в подразделении в начале 2000-х гг.**

Развитие вычислительной базы, наблюдавшееся в подразделении с 1990-х гг., создало

возможность математикам отделения достичь значительного прогресса в численном моделировании различных физических процессов. Наряду с качественным и количественным ростом возможностей математических методик отделения были созданы библиотеки решателей SЛАУ LParSol и Newt.

К началу 2000-х гг. мощность вычислительной техники в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ по отношению к периоду середины 1980-х гг. (за 15 лет) выросла в 10000 раз.

Динамичное развитие вычислительной базы продолжилось и в первом десятилетии XXI в. Приближался момент, когда производительность создаваемых в математическом отделении супер-ЭВМ с массовым параллелизмом была готова преодолеть рубеж в  $10^{12}$  операций в секунду. В этом случае, по расчетам И. Д. Софронова от 1975 г., открылась бы возможность перехода к массовому счету задач в трехмерной постановке.

Этот момент наступил в 2010 г., когда в математическом отделении ИТМФ в эксплуатацию была принята супер-ЭВМ петафлопсного класса ( $10^{15}$  операций в секунду). Интересно отметить, что этот рубеж в США был официально преодолен суперкомпьютером IBM Roadrunner в 2008 г. Это означает, что в 2010 г. общее отставание в создании супер-ЭВМ с массовым параллелизмом от лучших мировых образцов по вычислительной мощности сократилось до 2–3 лет.

С учетом все возрастающих возможностей вычислительной техники в первом десятилетии 2000-х гг. сотрудники отделения серьезное значение уделяли разработке эффективных алгоритмов распараллеливания математических методик для проведения расчетов многомерных задач с высокой эффективностью на сотнях и тысячах ядер.

Итак, к концу первого десятилетия XXI в. специалистам математического отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ удалось решить задачу по созданию (на тот момент из импортных комплектующих) отечественных образцов вычислительных систем, превосходящих значение  $10^{13}$  операций в секунду. Перед специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ встала задача по созданию новой технологии суперкомпьютерного моделирования в интересах проектирования и разработки промышленных систем и обоснования их надежности при резком сокращении (вплоть до полного отказа) полномасштабных испытаний.



Рис. 2. Комплексная замкнутая технология суперкомпьютерного моделирования в интересах проектирования и разработки промышленных систем и обоснования их надежности без полномасштабных испытаний

### Создание технологии суперкомпьютерного моделирования

Накопленный за более чем за 60-летний опыт применения математического моделирования для расчета задач по основной тематике позволил специалистам РФЯЦ-ВНИИЭФ создать к концу первого десятилетия XXI в. новую комплексную технологию суперкомпьютерного моделирования для промышленных систем. Эта технология подразумевала виртуальные (компьютерные) испытания для отдельных частей, узлов, промышленных систем (рис. 2).

К этому моменту мировая практика уже подтвердила, что на текущем историческом этапе важнейшим фактором, определяющим темпы развития и конкурентоспособность ОПК, а также стратегических отраслей промышленности, является уровень внедрения новых современных суперкомпьютерных технологий (СКТ) в процесс проектирования и разработки перспективных образцов техники. Уже на конкретных примерах было доказано, что СКТ не только помогают существенно сократить сроки и стоимость разработки высокотехнологичной продукции, но и дают возможность производить изделия нового качественного уровня, тем самым являясь наиболее эффективным технологическим и экономическим способом повышения конкурентоспособности и улучшения потребительских свойств продукции.

К концу первого десятилетия XXI в. стало очевидно, что активное и эффективное применение новых суперкомпьютерных технологий

служит локомотивом инновационного развития экономики, способствуя не только глубокой модернизации промышленности и ликвидации имеющегося технологического отставания, но и обеспечению лидерства в глобальной экономической конкуренции. Вместе с тем понятно, что развитие и внедрение новых суперкомпьютерных технологий требует комплексного решения целого ряда проблем. Так, вместе с высокопроизводительными ЭВМ с массовым параллелизмом требуются прикладные пакеты про-

грамм для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа, а также виртуальные (цифровые) модели исследуемых высокотехнологичных промышленных систем. Кроме того, для применения СКТ необходимо создание целого ряда обязательных компонентов. Это – база экспериментальных данных для проведения верификации и валидации математических инструментов, качественное системное программное обеспечение, надежные технологии удаленных вычислений (в том числе в защищенном режиме), нормативно-правовая база для обеспечения легитимности применения суперкомпьютерной технологии, подготовка кадров для промышленных предприятий и т. д.

### Начальный этап решения основных задач внедрения суперкомпьютерного моделирования в РФЯЦ-ВНИИЭФ

Этому этапу предшествовала инициатива группы специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ, которые при активной поддержке со стороны руководства Госкорпорации «Росатом» в июле 2008 г. выступили с идеей подготовить письмо-обращение в адрес Президента РФ с предложениями по развитию отечественных суперкомпьютерных технологий. Учитывая особую важность задачи, письмо-обращение было активно поддержано руководителями ведущих отраслей промышленности, директорами ряда крупных государственных предприятий и организаций науки и образования.

Письмо-обращение было замечено. Вопрос о развитии отечественных суперкомпьютеров,

программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа, а также их внедрении в промышленность был рассмотрен на заседании Комиссии при Президенте РФ, которое состоялось на базе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в Сарове 22 июля 2009 г.

Одним из результатов указанного заседания стало принятие проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», направленного на развитие в 2010–2012 гг. отечественных суперкомпьютерных технологий и их внедрение в работы предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности в целях создания конкурентоспособной отечественной наукоемкой продукции. Государственным заказчиком работ по проекту была определена Госкорпорация «Росатом», главным исполнителем – РФЯЦ-ВНИИЭФ. Таким образом, даже на самом высоком государственном уровне совершенствование СКТ в России было отнесено к числу важнейших направлений развития страны.

В результате выполнения проекта были разработаны и доведены до уровня практического применения основные компоненты СКТ.

1. Созданы пакеты отечественных программ для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа, являющиеся 100 % собственной отечественной разработкой, консолидирующей знания и опыт ведущих научных школ России. В том числе: ЛОГОС-CFD – для моделирования процессов теплообмена и аэро-, гидро-, газодинамики; ЛОГОС-Прочность – для моделирования статического и динамического деформирования конструкций; ДАНКО+ГЕПАРД – для оценки прочности конструкций при статических и динамических термосиловых нагрузках с учетом больших пластических деформаций; НИМФА – для моделирования процессов многокомпонентной многофазной фильтрации; ТДМСС – для моделирования нейтронно-физических процессов.

В указанных пакетах программ на тот момент было реализовано более 200 физико-математических моделей и методов, что позволило по функциональному наполнению охватить основные классы задач промышленности, решаемых при помощи программ инженерного анализа. Все созданные пакеты программ прошли процедуру государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ФИПС), а также были сертифицированы по ГОСТ.

В 2010–2013 гг. совместно с рядом ключевых предприятий высокотехнологичных от-

раслей промышленности (атомной энергетики, авиационной, автомобильной, ракетно-космической и др.) был выполнен комплекс работ по верификации, валидации и апробации пакетов созданных отечественных программ. В ходе этих работ было решено более 12000 тестовых и практических задач. Параллельно, совместно со специалистами предприятий (ОАО «Компания "Сухой"», ФКП «НИЦ РКП», ОАО «КБХА», ФГУП «ГНПРКЦ ЦСКБ ПРОГРЕСС», ОАО «СПБАЭП», ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ОАО «КАМАЗ») были созданы пилотные версии виртуальных суперкомпьютерных моделей сложных технических систем авиационной, автомобилестроения, атомной энергетики, ракетно-космической отрасли, предназначенных для воспроизведения различных режимов функционирования сложных изделий (самолет, автомобиль и т. д.) путем использования новой технологии – виртуальные (компьютерные) испытания для отдельных частей, узлов, систем.

В результате отработки СКТ на выделенных предприятиях-соисполнителях получилось создать:

– в атомной энергетике – технологию компьютерного моделирования оборудования корабельных и судовых ЯЭУ и разработать «виртуальную корабельную ЯЭУ»;

– в авиационной – технологию «виртуальный самолет», представляющую собой систему проектирования конкурентоспособных авиационных комплексов на основе информационных технологий нового поколения и позволяющей уже на стадии концептуального проектирования формировать рациональный облик авиационного комплекса, его подсистем и систем на основе проведения виртуальных испытаний по выбору оптимальной схемы самолета;

– в ракетно-космической отрасли – технологию имитационного моделирования стендовых систем, которая позволила отказаться от испытаний на мелкомасштабных моделях при разработке оптимальной конструкции стенда с имитацией высотных условий для отработки кислородно-водородного двигателя РД0146;

– в автомобилестроении – детальные полномасштабные компьютерные модели броневых автомобилей специального назначения семейства «ВЫСТРЕЛ», разрабатываемых по заказу МО РФ, что позволило оптимизировать и обосновать конструкцию для обеспечения требуемого уровня взрывозащищенности и бронестойкости.

2. В части развития высокопроизводительных вычислительных систем в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2011 г. была создана и сдана в эксплуатацию сверхмощная супер-ЭВМ мирового уровня. В целом, на вычислительной базе в РФЯЦ-ВНИИЭФ создан один из крупнейших в стране вычислительных центров коллективного пользования (ВЦКП). Он оснащен несколькими супер-ЭВМ собственной разработки с уникальным отечественным системным и прикладным программным обеспечением. Для удаленных пользователей была разработана уникальная технология проведения наукоемких расчетов в удаленном режиме, с защитой информации на основе аппаратно-программных средств разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ. На вычислительных ресурсах супер-ЭВМ ВЦКП начали вести счет более 70 предприятий и организаций РФ.

Кроме того, была создана новая для России линейка супер-ЭВМ – компактные супер-ЭВМ (КС-ЭВМ), ориентированные на массовое оснащение рабочих мест для специалистов в НИИ и КБ предприятий. По своим характеристикам КС-ЭВМ является уникальным конкурентоспособным продуктом для рынка высоких технологий. Технические характеристики КС-ЭВМ позволяют использовать ее непосредственно в рабочем помещении пользователя от офисной розетки. Для функционирования КС-ЭВМ не нужны дорогостоящие инженерные системы и специально обученный персонал. Компактные супер-ЭВМ являются уникальной разработкой, по ряду своих характеристик превосходящей мировые аналоги. Это повседневный инструмент для инженеров и специалистов НИИ и КБ предприятий. К началу 2022 г. было изготовлено и поставлено на предприятия промышленности и в другие организации 172 КС-ЭВМ.

Подводя итоги работы над проектом, отметим, что в результате совместных усилий кооперации все работы, запланированные на 2010–2012 гг. картой проекта, были выполнены в полном объеме, с превышением плановых значений по ряду ключевых индикаторов. Это было подтверждено Межведомственной комиссией, созданной при Госкорпорации «Росатом». Итогом успешно реализованного проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» стало создание основы для начала работы по внедрению и массовому использованию отечественных суперкомпьютерных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности РФ.

Последнее требовало безусловного продолжения работы над развитием основных компо-

нентов СКТ. Потому что использование новой технологии на предприятиях высокотехнологичных отраслях промышленности РФ было напрямую связано с существенным расширением классов решаемых задач; с появлением усложненных конструкций индустриальных систем; повышением их технических характеристик; ограниченными возможностями натуральных испытаний и экспериментальных исследований, требованиями существенного сокращения сроков создания систем. А это обуславливало необходимость дальнейшего развития отечественного конкурентоспособного программного обеспечения комплексного суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа; серьезных усилий по созданию полномасштабных трехмерных виртуальных (цифровых, компьютерных) моделей исследуемых систем; расширение составных частей (компонентов) СКТ и, как следствие, расширение кооперации ученых РФЯЦ-ВНИИЭФ и специалистов из предприятий разных отраслей.

Благодаря совместным усилиям специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ и ключевых предприятий промышленности к 2015 г. была создана базовая рабочая версия многофункционального пользовательского комплекса программ, которая включала следующие модули: Логос Аэро-Гидро, Логос Тепло, Логос Прочность, Логос Препост. С использованием базовой версии пакета программ ЛОГОС начался активный счет конкретных задач в интересах ряда высокотехнологических отраслей промышленности Российской Федерации.

### **Переход к этапу работы по внедрению и массовому использованию отечественных суперкомпьютерных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности РФ**

Импульсом к этапу развертывания активных работ по внедрению и массовому использованию отечественных суперкомпьютерных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности РФ стало принятое в 2016 г. решение Правительства РФ о выделении указанных работ в отдельное приоритетное технологическое направление «Технологии высокопроизводительных вычислений, включая суперкомпьютерные». Головной организацией, ответственной за реализацию работ по приоритетному технологическому направлению, был определен ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», а Р. М. Шагалиев в начале 2017 г. решением Военно-промышленной ко-

миссии РФ был наделен полномочиями руководителя данного приоритетного технологического направления.

Ключевыми задачами по рассматриваемому приоритетному технологическому направлению стали:

- разработка отечественного прикладного программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа;
- проектирование и создание супер-ЭВМ различной архитектуры;
- развитие методов и алгоритмов решения задач на вычислительных системах с массовым параллелизмом;
- оптимизация кодов под архитектуру супер-ЭВМ с отечественными процессорами «Эльбрус-8СВ»;
- нормативное обеспечение создания и применения высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий;
- подготовка высококвалифицированных специалистов и переподготовка кадров в области инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования и др.

### **Современное состояние развития суперкомпьютерного моделирования в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Дальнейшие перспективы развития**

#### **1. Разработка отечественного прикладного программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа.**

В 2017 г. Правительством Российской Федерации было принято решение о доработке базовой рабочей версии пакета ЛОГОС. Основная задача – создание специализированной пользовательской версии отечественного флагманского цифрового многомодульного продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС, которая обладала бы функционалом, обеспечивающим возможность проведения расчетов из не охваченных ранее актуальных классов задач суперкомпьютерного моделирования.

С этого момента начался этап активной работы по развитию функционала пакета ЛОГОС.

Все имевшиеся ранее модули были преобразованы в полномасштабные цифровые продукты Логос Аэро-Гидро, Логос Тепло, Логос Прочность, Логос Препост. В 2018 г. цифровой многомодульный продукт ЛОГОС был включен в единый реестр российского программного

обеспечения для электронных вычислительных машин и баз данных (приказ Минкомсвязи России от 30.11.2018 № 665) и внедрен в более чем 100 организациях промышленности и образования.

В 2021 г. к имевшимся цифровым модулям добавились цифровые продукты Логос Гидрогеология (для суперкомпьютерного моделирования в интересах обеспечения экологической безопасности промышленных объектов) и Логос Платформа (для возможности интегрирования создаваемых новых специализированных версий пакета Логос и разработок других организаций в единый отечественный пакет ЛОГОС).

В дальнейшем планируется создание следующих модулей:

- Логос АТОМ для суперкомпьютерного сквозного моделирования задач проектирования, обоснования безопасности и сопровождения эксплуатации объектов использования атомной энергии;
- Логос Аддитив для проведения предикативного анализа характеристик и формы изделий, изготавливаемых с использованием аддитивных технологий;
- Логос ЭМИ для численного моделирования воздействия электромагнитного излучения на высокотехнологичные изделия.

На 2022 г. охват задач промышленности с использованием цифрового многомодульного продукта ЛОГОС составил: аэродинамика – до 95 %; гидродинамика – до 95 %; прочность и разрушение – до 75 %; теплоперенос – до 90 %.

#### **2. Проектирование и создание новых супер-ЭВМ различной архитектуры.**

Как ранее отмечалось, с начала XXI в. специалисты математического отделения ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» создают супер-ЭВМ среднего и высокого уровня производительности, в том числе по заказам предприятий высокопроизводительных отраслей промышленности, предприятий ОПК и разных организаций. Например, на сегодняшний день ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработал и поставил по заказам предприятий ОПК и промышленности, учреждений науки и образования 20 супер-ЭВМ среднего и высокого класса.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ поступают заказы на супер-ЭВМ универсальной архитектуры (для применения в области высокопроизводительных вычислений, инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования)

и на супер-ЭВМ гетерогенной архитектуры (для применения в области технологий сверточных нейронных сетей, искусственного интеллекта, обработки «больших данных»). Но если раньше при создании супер-ЭВМ для сторонних организаций наши специалисты использовали компоненты иностранного производства, то в настоящее время поставлена задача и организованы работы по созданию базового ряда супер-ЭВМ из отечественных компонентов. Поэтому сегодня при разработке линейки супер-ЭВМ средней производительности гетерогенной архитектуры выпол-

нен комплекс мероприятий, включающий в себя разработку комплекта рабочей и конструкторской документации, создание операционной системы в защищенном исполнении, оптимизацию работы прикладного программного обеспечения под архитектуру процессора «Эльбрус» и ускорителя вычислений NM Card.

Опираясь на требования к коммуникациям со стороны параллельных приложений, специалисты математического отделения создали коммуникационную систему межпроцессорных обменов – СМПО-10С, которая может эффективно применяться в вычислительных системах для обмена данными между счетными процессами. По сути, это один из ключевых компонентов супер-ЭВМ.

Создание СМПО позволило в 2019 г. построить КС-ЭВМ на базе отечественных компонентов. В ее основу вошли отечественные процессоры «Эльбрус-8С», коммуникационная система СМПО-10С и операционная система «Эльбрус-Линукс».

На базе системы СМПО-10С также создан вычислительный комплекс производительностью 10 Тфлопс с топологией связей вычислительных узлов мульти-тор. Вполне логично, что постоянный рост вычислительной мощности центральных процессоров и арифметических ускорителей, а также существенное увеличение их количества требуют пропорционального увеличения пропускной способности каналов связи. Для эффективного использования современных вычислительных устройств в составе супер-ЭВМ сегодня в математическом отделении ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ выполняется проектирование системы межпроцессорных обменов нового по-

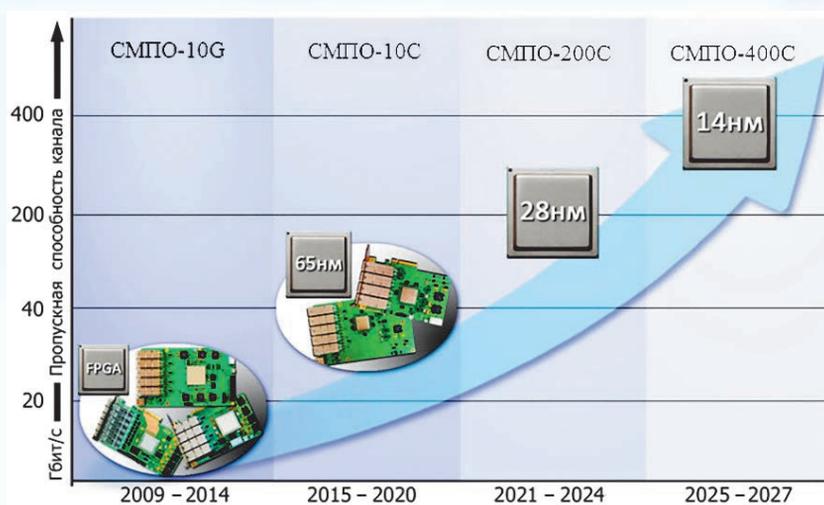


Рис. 3. Плановая динамика развития СМПО в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

коления – СМПО-200С с пятикратным увеличением скорости канала связи. Это не последняя разработка. Плановая динамика дальнейшего развития СМПО показана на рис. 3.

С 2016 г. специалисты математического отделения ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ ведут работы по разработке и сертификации дистрибутива защищенной операционной системы «Арамид» (ОС «Арамид») в интересах предприятий и высокотехнологичных отраслей промышленности. Дистрибутив ОС «Арамид» представляет собой сбалансированный набор общесистемного программного обеспечения для организации параллельных высокопроизводительных вычислений на супер-ЭВМ различной производительности. ОС «Арамид» является уникальной отечественной программной разработкой для супер-ЭВМ. Это единственная в России сертифицированная во ФСТЭК операционная система. Она внесена в реестр отечественного ПО и уже эксплуатируется более чем на 200 супер-ЭВМ в РФ. В настоящее время ведется разработка защищенной операционной системы для супер-ЭВМ на базе отечественных компонентов.

Также в настоящее время в математическом отделении проводятся исследования в области квантовых вычислений и создания фотонной вычислительной системы. С момента проведения в 2021 г. в Сарове конференции «Фотонная вычислительная машина» РФЯЦ-ВНИИЭФ является лидером всероссийской кооперации научных учреждений и производственных площадок Москвы и Зеленограда, Санкт-Петербурга, Самары, Нижнего Новгорода, Новосибирска, Переславля-Залесского, Таганрога. Цель кооперации – создание вычислительных сред на но-

вых физических принципах, имеющих преимущества перед традиционными ЭВМ на базе кремниевой микроэлектроники.

Специалисты математического отделения ИТМФ в тесном контакте с сотрудниками ИЛФИ ведут работы по применению оптоэлектроники и фотоники в гетерогенных суперкомпьютерных системах. Исследования проводятся в двух основных направлениях: по созданию аналоговой (АФВМ) и цифровой фотонных вычислительных машин. К 2030 г. планируется превзойти мировой уровень производительности на полностью отечественной компонентной базе с использованием полнофункциональной отечественной системы системного и прикладного программного обеспечения.

Основная цель всех указанных перспективных работ – создание новых супер-ЭВМ различной архитектуры с вычислительной производительностью, превышающей петафлопсный уровень ( $10^{15}$  операций в секунду), то есть выход на уровень эксафлопсной ( $10^{18}$  операций в секунду) и далее – к постэксафлопсной производительности. Новые возможности будущих вычислительных систем откроют математикам перспективы достижения нового уровня отечественных технологий суперкомпьютерного моделирования, возможность разработки новых физико-математических моделей, методов и программ суперкомпьютерного моделирования эксафлопсного уровня.

### **3. Нормативное обеспечение создания и применения высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий.**

Целью разработки нормативно-правового и нормативно-технического обеспечения в области СКТ является юридическое обеспечение новой технологии проектирования и разработки изделий ОПК и высокотехнологичных отраслей промышленности.

В соответствии с решением коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации от 24.10.2018 г. создана «Программа стандартизации в области разработки и применения компьютерных моделей и электронных конструкторских документов на изделия военной техники 2020–2025 гг.», утвержденная Минпромторгом России по согласованию с Минобороны России и Росстандартом. Программа стандартизации является уникальным документом в этой области ввиду того, что включает разработку и актуализацию как национальных, так и государственных военных стандартов.

Реализация программы стандартизации осуществляется в рамках деятельности технического комитета по стандартизации «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии» (ТК-700). Эти работы направлены на создание единой системы нормативных правовых актов и нормативно-технической документации, определяющих порядок применения технологий высокопроизводительных вычислений на различных этапах жизненного цикла высокотехнологичных изделий.

По итогам 2021 г. в рамках деятельности ТК-700 были разработаны 5 стандартов (3 стандарта в первой редакции и 2 стандарта в окончательной редакции) по применению высокопроизводительных вычислений в процессах жизненного цикла изделий вычислительной техники. Широкий общественный резонанс как среди предприятий ОПК, так и отраслей гражданской промышленности получила разработка уникального в своем роде ГОСТа «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». Разработанный ГОСТ является первым нормативно-техническим документом, устанавливающим единое определение «цифрового двойника изделия», общие положения и требования по созданию и применению цифровых двойников изделий, и, что особенно важно, не является переводом зарубежного стандарта.

В заключение отметим, что основные задачи долгосрочной программы по приоритетному технологическому направлению «Технологии высокопроизводительных вычислений, включая суперкомпьютерные», планомерно реализуются. Это является залогом того, что работы по внедрению и массовому использованию отечественных суперкомпьютерных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности РФ будут успешно решены.

**ШАГАЛИЕВ Рашит Мирзагалиевич –**

член-корр. РАН, руководитель математического отделения ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

**СМОЛЯКОВА Алла Валерьевна –**

начальник научно-исследовательской лаборатории ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

**ЕГОРШИН Сергей Павлович –**

старший научный сотрудник ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ