

# Математическому отделению – 70 лет

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

## Историческая справка

9 апреля 1946 г. Совет Министров СССР принял закрытое постановление о создании на базе завода № 550 Министерства сельскохозяйственного машиностроения и прилегающей к нему территории (поселок Саров) удаленного от Москвы конструкторского бюро при Лаборатории № 2 АН СССР, получившего название «КБ-11». Этим же постановлением определялось руководство КБ-11: начальником был назначен генерал П. М. Зернов, главным конструктором – профессор Ю. Б. Харитон.

Задача перед руководством созданного КБ-11 ставилась предельно ясно и четко – в сжатые сроки создать требуемое изделие (условно названное «реактивный двигатель "С"» и получившего краткое название «РДС-1»). Завершение разработки должно было закончиться проведением государственных испытаний.

В силу особой важности и сложности задач, требующих научного решения, актуальной была организация не только компонентов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и производственно-технологических работ, но также и комплексных расчетно-теоретических исследований. То есть изначально в КБ-11 для проведения работ подразумевалось привлечение физиков-теоретиков и математиков.

## Становление коллектива математиков

Первым математиком в КБ-11 стал кандидат физ.-мат. наук М. М. Агрест, прибывший на «объект» 1 июня 1947 г. Важное значение для появления в КБ-11 широкомасштабных расчетно-теоретических работ имело подписанное 8 февраля 1948 г. И. В. Сталиным Постановление СМ СССР «О плане работ КБ-11 при Лаборатории № 2 АН СССР». В частности, пункт 5 этого постановления в адрес академика Н. Н. Семенова, директора Института химической физики (ИХВ АН СССР), гласил: «Обязать т. Семенова направить с 10 февраля 1948 г. на "объект" сроком на один год группу работников теоретического отдела ИХВ во главе с начальником теоретического отдела т. Зельдовичем».

Прибывший 9 марта 1948 г. из ИХФ АН СССР в КБ-11 член-корреспондент АН СССР, профессор Я. Б. Зельдович возглавил созданный здесь в феврале 1948 г. теоретический отдел, который вошел в состав уже имевшегося в КБ-11 научно-исследовательского сектора (НИС). В этот теоретический отдел № 50 НИС в августе 1948 г. из ИХФ прибыл физик-теоретик и математик Н. А. Дмитриев. А 20 сентября 1948 г. в отдел № 50 НИС был переведен уже работавший в КБ-11 математик М. М. Агрест. Н. А. Дмитриев и М. М. Агрест стали первыми математиками КБ-11.

М. М. Агрест сразу начал готовить к работе состав собранной небольшой расчетной группы будущих лаборантов-вычислителей. Первыми сотрудниками расчетной группы М. М. Агреста в отделе № 50 НИС стали лаборанты-вычислители: В. И. Петухова, Е. П. Бодренко и А. З. Оболочкова. М. М. Агрест обладал педагогическим даром и хорошими организаторскими способностями. Для сотрудников своей группы он читал курс лекций по началам аналитической геометрии и математическому анализу, а также вел семинар по численным методам математики.

С 1 января 1949 г. НИС переименовали в сектор № 20, а отделу Я. Б. Зельдовича вместо № 50 присвоили новый номер – № 31.

Основные математические расчеты для КБ-11 в то время выполнялись в нескольких внешних математических организациях. Такой подход был закреплен Постановлением Совета Министров СССР еще от 10 июня 1948 г. «О дополнительных заданиях по плану специальных научно-исследовательских работ на 1948 г.». Согласно пунктам 3 и 4 этого постановления к выполнению математических заданий КБ-11 был привлечен Математический институт АН СССР им. В. А. Стеклова и его ленинградское отделение. Вместе с ними для математических работ был привлечен Институт теоретической геофизики (ИТГ) АН СССР, который должен был работать в интересах КБ-11 по заданиям от Института физических проблем АН СССР. Силами математиков указанных выше организаций на первой стадии проведения теоретических и мате-

математических работ по созданию РДС-1 решались наиболее сложные математические проблемы.

Однако, по мере расширения объема расчетно-теоретических исследований все более остро стала ощущаться необходимость укрепления математической группы непосредственно в КБ-11 – в группе М. М. Агреста отдела Я. Б. Зельдовича. В качестве поддержки математической расчетной группы к М. М. Агресту в 1949 г. прибыла лаборантка-вычислитель В. И. Ворошилова. Затем, по распределению после окончания механико-математического факультета МГУ, в отдел прибыла первая молодой специалист, инженер-математик Е. В. Малиновская. В сентябре 1949 г. из Куйбышевского авиационного института в отдел прибыла математик Т. В. Малыгина. Кроме того, в октябре 1949 г. в отдел прибыл мастер-механик по клавишным арифмометрам В. А. Фролов. В 1949–1950 гг. математики группы М. М. Агреста занимались (параллельно с внешними московскими и ленинградскими группами математиков) определением критической массы делящихся веществ, обчислением газодинамических опытов, выбором конструктивных элементов заряда, постановкой заданий для расчетов движения шаров и оболочек с новым уравнением и другими вопросами.

Практически постоянно сотрудников группы М. М. Агреста привлекали для решения задач с большим числом операций. Вычислительные работы тогда проводились на логарифмических линейках, механических машинках «Феликс» (рис. 1) или электромеханических немецких клавишных машинках «Мерседес» (рис. 2).

С конца 1948 и в 1949–1950 гг. наиболее характерными расчетами для группы М. М. Агреста были задачи на критические массы. Часто рассчитывались многомерные интегралы (методами трапеций, Гаусса, Симпсона) и обыкновен-

ные дифференциальные уравнения (методами Эйлера, Адамса – Штермера с тремя разностями).

В 1949 г. по заказу Н. А. Дмитриева был сделан расчет стереометрических интегралов. Окончание этого длительного расчета было отмечено стихотворением М. М. Агреста: «Счет окончен. Дамы блещут. Краевой эффект получен. Коля мрачен. Озадачен. До конца он не изучен».

Отметим, что с конца 1948 и в 1949–1950 гг. математиками отдела Я. Б. Зельдовича в КБ-11 было выполнено довольно большое количество расчетов, связанных с разработкой первых и последующих образцов оружия сдерживания. Эти расчеты, несмотря на их фрагментарный характер, сыграли важную роль при определении основных параметров разрабатываемых изделий и при создании теоретических концепций новых конструкций.

Серьезное значение для дальнейшего развития в КБ-11 теоретического и математического направлений работ имело Постановление СМ СССР от 26 февраля 1950 г. «О работах по созданию РДС-6». В соответствии с этим постановлением Физическому институту (ФИАН) АН СССР необходимо было откомандировать в КБ-11 расчетно-теоретическую группу И. Е. Тамма. Группа И. Е. Тамма стала собираться в КБ-11 с марта 1950 г. В нее вошли: А. Д. Сахаров, Ю. А. Романов, Ю. А. Померанчук и С. З. Беленький. Кроме физиков, в команду к И. Е. Тамму прибыли и математики. 1 апреля 1950 г. из Москвы прибыл Н. Н. Боголюбов (тогда уже член-корреспондент АН СССР, общепризнанная научная величина в области математики, физики и механики). Вместе с ним в КБ-11 приехали его ученики – В. Н. Климов, Д. В. Ширков, Д. Н. Зубарев.

### Образование математического отдела

В июне 1950 г. Ю. Б. Харитон пригласил в КБ-11 (в отдел И. Е. Тамма) математика В. С. Владимирову из ленинградского отделения Математического института им. В. А. Стеклова, который еще с августа 1948 г. по заданиям КБ-11 занимался расчетами критических масс делящегося вещества в интересах РДС-1. В. С. Владимиров прибыл в КБ-11 в ноябре 1950 г. Таким образом, осенью 1950 г. математики КБ-11 оказались в двух теоретических отделах – в отделе И. Е. Тамма и в отделе Я. Б. Зельдовича. Проанализировав ситуацию, Н. Н. Боголю-

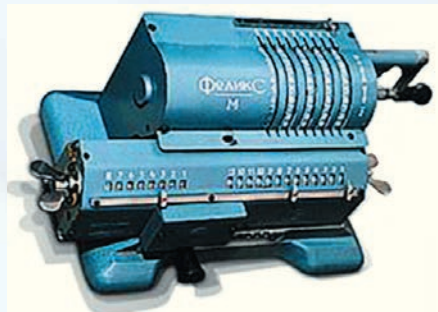


Рис. 1. Механическая вычислительная машинка «Феликс». Скорость вычисления – менее 1 оп./с



Рис. 2. Настольная электромеханическая немецкая клавишная машинка «Мерседес». Скорость вычисления – менее 1 оп./с

бов инициировал работу по объединению этих двух групп в рамках единого математического отдела. Его инициатива была поддержана. В результате в КБ-11 был создан единый математический отдел, который возглавил Н. Н. Боголюбов. В этом отделе были образованы две группы математиков (группа В. С. Владимирова и группа М. М. Агреста), которые выполняли вычислительные работы по заданиям физиков-теоретиков для отдела И. Е. Тамма и для отдела Я. Б. Зельдовича соответственно.

Для ускорения проведения тематических расчетов нашими математиками и физиками уже тогда разрабатывались собственные математические методы. Например, математик В. С. Владимиров под руководством Н. Н. Боголюбова разработал оригинальный метод решения кинетических уравнений для сферически симметричных областей, основанный на использовании характеристик интегро-дифференциального уравнения Больцмана (ныне этот метод называется методом Владимирова). В это же время теоретик Ю. А. Романов предложил для расчетов свой усовершенствованный диффузионный метод.

С весны 1951 г. (видя высокие нагрузки на сотрудников двух теоретических, математического, конструкторских и других отделов сектора 20) руководство КБ-11 стало обращаться в ПГУ с просьбами об оказании помощи в дополнительном привлечении на объект кадров физиков, математиков, конструкторов. И эти просьбы нашли поддержку. Об этом свидетельствуют, например, материалы доклада ПГУ И. В. Сталину о ходе работ по развитию предприятий атомной промышленности от 25 марта 1951 г. В разделе III того документа отмечается: «...Для ускорения работы КБ-11 будет оказана помощь путем дополнительного привлечения математиков и физиков. Будет проведено также укрепление работающих по заданию КБ-11 расчетно-математических бюро во внешних математических организациях. Большой объем вычислительных работ требует оснащения расчетных бюро современными быстродействующими вычислительными машинами. Предложения о разработке и организации выпуска вычислительных машин нами подготовлены и внесены на рассмотрение СМ СССР».

Указанный документ для истории развития прикладной вычислительной математики в нашей стране имел огромное значение! Это был первый официальный документ, где на самом высшем уровне руководства страны ставился вопрос о создании отечественных ЭВМ! Ссылаясь

на него, сегодня можно смело сказать, что само появление ЭВМ и их дальнейшее совершенствование в значительной мере было связано с появлением вычислительных проблем, которые необходимо было решать в рамках реализуемого Атомного проекта.

Влияние указанного документа на рост числа математиков в КБ-11 не заставил долго себя ждать. Летом 1951 г. в КБ-11 прибыл С. А. Авраменко, ученик Н. Н. Боголюбова, один из первых программистов СССР, кандидат физ.-мат. наук, и занял должность заведующего лабораторией программирования с целью разработки программ расчета производственных задач на заказанной ЭВМ «Стрела» (поступление узлов которой должно было начаться с 1956 г.).

В 1951 г. в КБ-11 из Ленинграда приехала большая группа опытных вычислителей из числа геодезистов. Кроме того, после окончания университетов (Московского и Ленинградского) к осени 1951 г. приехало 6 молодых специалистов, среди которых была И. А. Жернак (Адамская). В декабре 1951 г. из Института ТМ и ВТ им. Лебедева приехал А. А. Бунатян. Математический отдел активно пополнялся специалистами.

К осени 1951 г. математики отдела Н. Н. Боголюбова по заданиям физиков-теоретиков успешно выполнили большое число расчетов, сыгравших значимую роль при определении основных параметров изделий РДС-2 и РДС-3, успешно испытанных 24 сентября и 18 октября 1951 г. соответственно. Это свидетельствовало о том, что коллектив математиков КБ-11 к концу 1951 г. по научной отдаче уже начал конкурировать с внешними ленинградскими и московскими командами математиков, обслуживавших КБ-11.

### Формирование математического сектора

Успешные испытания образцов изделий РДС-2 и РДС-3 осенью 1951 г. подтвердили правильность новых направлений совершенствования изделий, предлагаемых специалистами КБ-11. Теперь эти направления работ необходимо было развивать и наращивать, что объективно требовало проведения в КБ-11 серьезных структурных изменений. И они начались...

27 октября 1952 г. руководством КБ-11 было подписано новое штатное расписание предприятия на 1952–1953 гг. и направлено в ПГУ при СМ СССР, где и было утверждено 24 декабря 1952 г. Согласно новому штатному расписанию в КБ-11 появилось несколько самостоятельных

секторов, в том числе теоретические сектора № 1 и 2 (сейчас в составе ИТМФ), газодинамический сектор № 3 (сейчас ИФВ), физический сектор № 4 (сейчас ИЯРФ), а также математический сектор № 8 (математическое отделение, которое функционирует в настоящее время в составе ИТМФ).

Математическое отделение в то время состояло из 6 отделов (рис. 3): отдел интегральных уравнений (13 сотрудников, начальник – В. С. Владимиров), отдел дифференциальных уравнений (11 сотрудников, начальник – А. А. Бунатян), отдел математической физики (5 сотрудников), отдел программирования (5 сотрудников, начальник отдела и заместитель начальника математического отделения – С. А. Авраменко), отдел ремонта счетных машин (5 сотрудников). Начальником математического отделения был назначен член-корреспондент АН СССР Н. Н. Боголюбов. Дата подписания приказа – 14 февраля 1953 г. – является официальным днем основания математического отделения.

Поскольку в 1953 г. шла подготовка к испытаниям целой группы разрабатываемых в КБ-11 изделий (РДС-4, РДС-5, РДС-6с), сотрудникам математического отделения предстояло выполнить большой объем вычислений. Вот как вспоминала И. А. Адамская о работе коллег своего отдела, с которыми она вела расчеты по заданиям Д. А. Франк-Каменецкого: «...Работали

тогда очень напряженно. Существовал бригадный принцип организации расчетов и нормированный труд. Норма составляла 800 операций в день на расчетчика. Условия работы были тяжелыми. В комнате площадью 18–20 м<sup>2</sup> вместе с инженером – руководителем бригады работали 3–4 вычислителя. В течение рабочего дня непрерывно, как пулеметы, строчили "Мерседесы". И, конечно, никакой звукоизоляции! Трудно было вычислителям-техникам и лаборантам, но все-таки их работа была хотя и напряженной, но расписана по операциям. Труднее приходилось инженерам – руководителям бригады, которым в этих условиях надо было не только анализировать расчеты, но и находить нестандартные решения для устранения разного рода проблем, возникающих в процессе счета...».

За совокупность расчетно-теоретических работ по изделиям РДС-2, РДС-3, РДС-4, РДС-5 и РДС-6с, наряду с московскими и ленинградскими математиками, Сталинские премии II степени были вручены также и математикам, представлявшим КБ-11: Н. Н. Боголюбову и В. С. Владимирову. Кроме того, за вклад в разработку изделия РДС-6с Н. Н. Боголюбов осенью 1953 г. был избран в состав действительных членов Академии наук СССР. В связи с переходом Н. Н. Боголюбова в июне 1953 г. на новое место работы в КБ-11, начальником математического отделения 08 с 27 июня 1953 г. был утвержден его бывший ученик по Киевскому университету и его заместитель по отделению 08 – С. А. Авраменко.

Здесь важно подчеркнуть, что к осени 1953 г. коллектив специалистов математического отделения 08 подтвердил, что по научной отдаче он уже подравнился с внешними командами математиков, обслуживавших в те годы КБ-11. Это стало точкой отсчета формирования в КБ-11 (и по сегодняшний день существующей и развивающейся в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») собственной научной школы прикладной вычислительной математики, основателем которой в полной мере мы можем считать академика Н. Н. Боголюбова (выехавшего в декабре 1953 г. из КБ-11 для работы в Объединенном институте ядер-



Рис. 3. Структура теоретических секторов № 1 и 2 и математического отделения по штатному расписанию КБ-11 на 1952–1953 гг.

ных исследований в г. Дубна). А продолжателями Н. Н. Боголюбова – С. А. Авраменко, И. Д. Софронова (возглавившего математическое отделение в 1966 г.) и Р. М. Шагалиева (принявшего математическое отделение от И. Д. Софронова в 2002 г.).

### Вычислительная техника первого поколения

Помимо проведения расчетов, главной задачей в тот момент, стоящей перед специалистами математического отделения, была подготовка к работе по приему и запуску в эксплуатацию ожидавшейся с 1956 г. ЭВМ «Стрела». К этому времени Н. А. Дмитриевым была написана двумерная программа «Д1» (созданная на основе методики и разностной схемы Д-расчета двумерных газодинамических уравнений в переменных Лагранжа). Программа в 1956 г. была отлажена в ОПМ МИ АН СССР усилиями Е. В. Малиновской и И. Д. Софронова (который под руководством академика М. А. Лаврентьева окончил аспирантуру при мехмате МГУ, успешно защитил кандидатскую диссертацию и с декабря 1955 г. работал в математическом секторе 8 КБ-11). Программа «Д1» стала одной из первых двумерных программ в нашей стране, что было весомым достижением математического отделения в целом.

Поставка компонентов для ЭВМ «Стрела» и ее наладка длились практически год. 4 марта 1957 г. ЭВМ «Стрела» была введена в эксплуатацию. Это была громадная ЭВМ первого (лампового) поколения, производительностью 2000 операций в секунду, которая занимала площадь зала почти в 300 м<sup>2</sup> (рис. 4).



Рис. 4. ЭВМ «Стрела» первого (лампового) поколения функционировала во ВНИИЭФ до 1963 г.



Рис. 5. ЭВМ «М-20» первого (лампового) поколения, 1961–1969 гг.

С весны 1957 г. на ЭВМ «Стрела» начался счет производственных задач. В том числе и двумерных газодинамических задач по программе «Д1».

В январе 1961 г. запустили ЭВМ «М-20» первого (лампового) поколения, мощную по тем временам, с производительностью 20 000 операций в секунду (рис. 5).

Для ЭВМ «М-20» за достаточно короткие сроки под руководством И. А. Адамской, И. В. Потугиной и И. Я. Пламеннова были созданы новые программы типа «Б», «КПД», «И-0», отвечающие запросам разработчиков изделий. Невозможно назвать всех активных участников этих работ. Крупным вкладом в развитие математического отделения 08 стало создание Н. А. Дмитриевым методики И-332. Сегодня признано, что Н. А. Дмитриев своими работами оказал неограниченное влияние на развитие математических методик и программ, а также на формирование научного потенциала математического отделения. Его работы сыграли существенную роль в дальнейшей разработке новых изделий.

В 1963 г. начальник математического отделения 08 С. А. Авраменко вернулся на работу в Киев, поэтому исполняющим обязанности начальника математического отделения 08 в 1963 г. был назначен Ю. К. Пужляков.

### Вычислительная техника второго поколения

Линия ЭВМ «М-20» была продолжена ее полупроводниковыми (транзисторными) аналогами той же производительности (20 000 операций в секунду), но более компактными и надежными ЭВМ. Это были ЭВМ второго (полупроводникового) поколения – БЭСМ-3 и БЭСМ-4. 27 января 1966 г. вступила в строй БЭСМ-3. А затем с интервалом в год еще три БЭСМ-4 (рис. 6).

В 1966 г. директор КБ-11 Б. Г. Музруков (руководивший предприятием с 1955 по 1974 г.) принял решение о создании при управлении предприятия экономического вычислительного центра (ЭВЦ). Начальником этого ЭВЦ Б. Г. Музруков назначил Ю. К. Пужлякова. А руководителем математического отделения 08 с 1966 г. стал И. Д. Софронов, который возглавлял это подразделение более 35 лет (до 2002 г.).

Он внес большой вклад в развитие математического отделения 08. Например, реализовал свою выдвинутую еще в 1958 г. идею проводить совместные научные конференции ВНИИЭФ и ВНИИТФ с привлечением сотрудников ИПМ. Впоследствии такие конференции стали международными. И. Д. Софронов внес личный вклад в организацию и издание с 1978 г. научно-технического сборника «Вопросы атомной науки и техники», где до 2008 г. был главным редактором серии «Методики и программы численного решения задач математической физики» (с 1989 г. – «Математическое моделирование физических процессов»). И. Д. Софронов создал систему отбора, подготовки и научно-производственного роста кадров математиков, для чего в составе группы активистов теоретического отделения и при поддержке руководства ВНИИЭФ инициировал создание на базе отделения МИФИ-4 спецфакультета, и в его составе – кафедры прикладной математики, которой руководил с 1991 по 2008 г. В начале 1990-х гг. И. Д. Софронов инициировал и организовал процесс разработки и создания на базе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» современных отечественных высокопроизводительных вычислительных систем передового для нашей страны уровня. Вместе с тем, И. Д. Софронов внес существенный вклад в разработку методов математического моделирования сложных процессов, происходящих в разрабатываемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ изделиях, в решение возникающих при этом математических задач. Так, под руководством И. Д. Софронова во второй половине 1960-х гг. успешно начали развиваться два направления нерегулярных методик: МЕДУЗА и ДМК, отличающиеся методами расчета и способами сохранения выпуклости ячеек сетки. Первое возглавлял И. Ф. Подливаев, второе – В. В. Рассказова и Н. А. Попов.

Накопленное программное обеспечение на «М-20» использовалось для этих ЭВМ практически без переделок. ЭВМ «БЭСМ-4» оказались настолько удобными, миниатюрными, надеж-



Рис. 6. ЭВМ «БЭСМ-4» (20 тыс. оп./с) – это ЭВМ второго (полупроводникового) поколения, 1966–1975 гг.

ными, что их получали и запускали даже тогда, когда уже получили и запустили первые (из девяти) поступавших с 1966 г. намного более мощные ЭВМ второго поколения – ЭВМ «БЭСМ-6».

Первая из поступивших ЭВМ «БЭСМ-6» с производительностью 1 млн. операций в секунду была принята в эксплуатацию 25 октября 1967 г. (рис. 7).

Под ЭВМ «БЭСМ-6» были созданы новые методики. Основным достижением в те годы явилась разработанная под руководством В. Л. Загускина и В. А. Сараева двумерная методика СИГМА для расчета газодинамических течений с учетом теплопроводности. Долгие годы мето-



Рис. 7. ЭВМ второго (полупроводникового) поколения «БЭСМ-6» (1 млн. оп./с), 1967–1991 гг.

дика СИГМА была основной производственной программой расчета двумерных течений теплопроводного газа с учетом большого числа других физических процессов. В дальнейшем, под руководством и при активном участии С. М. Бахраха и его сотрудников, были разработаны методики расчета двумерных течений с большими деформациями контактных границ на основе метода концентраций.

К 1978 г. в математическом отделении был создан вычислительный центр, состоящий из девяти ЭВМ «БЭСМ-6» с общей внешней памятью, позволившей провести напряженные расчеты параметров изделий перед натурными испытаниями.

### Вычислительная техника третьего поколения

В 1978 г. в вычислительном центре к БЭСМ-6 добавились ЭВМ третьего поколения на интегральных схемах (рис. 8) серии ЕС (ЕС-1050 с



Рис. 8. ЭВМ третьего (на интегральных схемах) поколения единой серии стран СЭВ – ЕС 1050–ЕС 1066 (от 0,5 до 5 млн. оп./с), 1978–2000 гг.



Рис. 9. ЭВМ третьего (на интегральных схемах) поколения серии «Эльбрус-1К2», 1980–2000 гг.

производительностью 500 000 операций в секунду, затем ЕС-1060 и ЕС-1061 и, наконец, самая мощная из этой серии ЕС-1066 с производительностью 5 млн. операций в секунду).

Основными вычислителями с 1980 г. в математическом отделении стала ветвь многопроцессорных вычислительных комплексов третьего (на интегральных схемах) поколения серии «Эльбрус». Сначала это были «Эльбрус-1К2» (рис. 9) и «Эльбрус-1КБ».

И, наконец, главным вычислителем с 1985 по 2000 г. в математическом отделении был многопроцессорный вычислительный комплекс (МВК) «Эльбрус-2» с производительностью (в 10-процессорном варианте), равной 125 млн. операций в секунду.

В период 1970-х гг. в математическом отделении получили развитие интерпретаторы пре- и пост-обработки данных, технологии машинно-независимого программирования на языках высокого уровня и интеграции разнородных программ в единый комплекс. Большой вклад в это направление внес коллектив М. И. Каплунова.

Значимым достижением математического сектора в начале 1980-х гг. стало создание под руководством И. Д. Софронова первого в СССР неоднородного вычислительного комплекса НВК (имевшего в своем составе такие ЭВМ, как ЭВМ «БЭСМ-6», ЭВМ серии ЕС и ЭВМ «Эльбрус») и связанной с ним вычислительной сети коллективного пользования (ВСКП). ВСКП обеспечивала связь более тысячи терминалов в подразделениях ВНИИЭФ с НВК. Наличие в НВК самых мощных по тому времени ЭВМ позволило приступить к счету двумерных и начать пробные расчеты трехмерных задач. Причем, с 1976 г. приступить уже к счету отдельных задач

по некоторым методикам в режиме распараллеливания, что было передовым достижением того времени.

### Вычислительные системы с массовым параллелизмом

Несмотря на возможности использования вычислительных мощностей МВК «Эльбрус-2», запросы математиков во второй половине 1980-х гг. росли быстрее. А нехватка мощностей вычислительного центра все более стала сдерживать математиков в реализации планов развития двумерных методик и создания на их основе новых программ.

По инициативе И. Д. Софронова и при поддержке Л. Д. Рябева (министра МСМ) и Б. Ю. Любовина (главного инженера МСМ) было решено на базе математического отделения ВНИИЭФ организовать разработку собственных высокопроизводительных вычислительных систем с массовым параллелизмом. К тому времени в математическом отделении был уже накоплен значительный опыт эксплуатации и модернизации вычислительной техники, сформировался уникальный по компетенции коллектив специалистов электроников и машинников. В 1989 г. под руководством С. А. Степаненко в отделении был создан специальный отдел.

А в 1993 г. специалистами отдела С. А. Степаненко была представлена мультипроцессорная система МП-3, в которой процессорные элементы объединялись системой межпроцессорного обмена (СМПО), разработанной на отечественном кристалле. Это позволило математикам и программистам своевременно приступить к освоению и разработке параллельных методов решения задач. На тот момент было изготовлено пять экземпляров МП-3, четыре из которых были поставлены в различные НИИ нашей страны, а один экземпляр приобрела Ливерморская национальная лаборатория (США).

Опыт разработки МП-3 позволил специалистам математического отделения 08 РФЯЦ-ВНИИЭФ создать в 2000 и 2001 г. первые мультипроцессорные супер-ЭВМ из зарубежных компонентов с рекордными значениями вычислительной мощности в Европе и Азии. Одновременно с развитием вычислительных систем серии МП в начале 2000-х гг. под руководством В. Н. Стрюкова были созданы супер-ЭВМ серии ВС.

В целом, развитие вычислительной базы в тот период позволило математикам достичь значительного прогресса в численном моделировании

физических процессов. В 1990-е гг. математики активно продвинулись в работах по развитию двумерных методик.

В 1999 г. теоретические сектора и математический сектор приказом В. Н. Михайлова, министра РФ по атомной энергии, были объединены в рамках Института теоретической и математической физики (ИТМФ).

В 2002 г. математическое отделение 08 ИТМФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» возглавил и руководит им в настоящее время Р. М. Шагалиев. При его руководстве в 2003 г. были выполнены работы по объединению разработанных высокопроизводительных многопроцессорных ЭВМ в единый суперкомпьютерный неоднородный вычислительный комплекс (суперкомпьютерный НВК). В состав которого вошли несколько высокопроизводительных многопроцессорных ЭВМ с общей дисковой и архивной памятью, а также единая система управления, сбора информации для анализа эффективности работы ЭВМ. Под руководством В. Ф. Волгина для созданного неоднородного комплекса ЭВМ была разработана «Автоматизированная система учета производственных расчетов». В 2003 г. завершились работы по созданию связанной с суперкомпьютерным НВК сети рабочих станций индивидуального пользования, которая обеспечивает комфортную работу пользователей в рамках интегрированной вычислительной системы (ИВС), включающую в себя общие вычислительные ресурсы (суперкомпьютерный НВК), систему централизованного ввода-вывода, информационные серверы. Были проведены работы по развитию программно-аппаратного параллельного комплекса для решения задачи визуализации и анализа огромных наборов данных, являющихся результатами математического моделирования.

С учетом все возрастающих возможностей вычислительной техники в первое десятилетие 2000-х гг. серьезное значение уделялось разработке эффективных алгоритмов распараллеливания математических методик для проведения расчетов с высокой эффективностью на сотнях и тысячах узлах, были реализованы новые физико-математические модели и эффективные алгоритмы, например, методика для решения в параллельном режиме двумерных и трехмерных задач газовой динамики с учетом процессов детонации, теплопроводности, турбулентного перемешивания, упругопластических свойств веществ на регулярных сетках; методики для расчета пространственных (одно-, двух- и трех-



мерных) движений многокомпонентных теплопроводных сред в эйлерово-лагранжевых координатах на параллельных вычислительных системах; методики для расчета двумерных и трехмерных задач газодинамики, теплопроводности, детонации и упругопластичности на неструктурированных сетках; методика, предназначенная для решения двумерных и трехмерных задач газовой динамики, с учетом процессов детонации и упругопластичности в многокомпонентных сплошных средах; методика для решения на неструктурированных и структурированных адаптивных подвижных эйлеровых сетках трехмерных задач газовой динамики с выделением особенностей решения (ударные и детонационные волны, контактные разрывы, фронты горения и т. д.); методики для решения таких задач, как пробивание преград, взрывы в различных средах, соударения, турбулентное перемешивание, прочность конструкций, разрушение трубопроводов, пожары; методика для расчетов двумерных и трехмерных нестационарных задач переноса нейтронов с учетом кинетики нейтронно-ядерного взаимодействия, а также нестационарных нелинейных задач переноса энергии излучением, электронами, ионами с учетом неравновесности процессов взаимодействия между излучением и средой; методика для решения в параллельном режиме методом Монте-Карло систем связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов.

Несомненно, сокращению сроков создания выше названных методик способствовало тесное взаимодействие специалистов математического отделения со специалистами теоретических подразделений ИТМФ, у которых проводимые в математическом отделении работы по развитию методик и созданию программных комплексов всегда находили активную поддержку.

### Современный этап

Современный период берет отсчет с 2010-х гг. В это время наряду с выполнением в полном объеме работ по основной тематике РФЯЦ-ВНИИЭФ перед математическим отделением была поставлена задача внедрения на предприятиях ОПК и гражданского машиностроения большого числа наукоемких разработок, связанных с суперкомпьютерным моделированием и дальнейшим развитием вычислительной базы. Вот некоторые из этих разработок.

### Проект «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий»

С 2010 г. специалисты математического отделения приступили к активным работам по разработке и созданию конкурентоспособных технологий суперкомпьютерного моделирования и их последующего внедрения на предприятия высокотехнологичных отраслей промышленности РФ.

В 2010–2012 гг. эти работы велись в рамках проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», утвержденного Комиссией при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России. Руководство проектом было возложено на Государственную корпорацию по атомной энергии «Росатом», а конкретное исполнение на ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В рамках ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» работу по реализации утвержденного проекта возглавил «Директорат» в составе: В. Е. Костюкова, В. П. Соловьева, Р. М. Шагалиева, который определил весь спектр работ, необходимых для реализации проекта и утвердил из числа ведущих специалистов отделения ответственных за выделенные направления спектра. Чрезвычайно большое значение для реализации проекта сыграло участие в нем академика РАН, директора НИИСИ РАН В. Б. Бетелина. В частности, им была предложена идея создания в рамках проекта малого класса супер-ЭВМ для массового оснащения рабочих мест исследователей и конструкторов, получивших в дальнейшем название «компактных супер-ЭВМ».

Важным шагом «Директората» стало решение о межотраслевом объединении усилий в работе над проектом. Работа 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. Межведомственной комиссией было установлено, что работы выполнены на высоком научно-техническом уровне, достигнуты крупные практические результаты, имеющие важное значение для страны. Также комиссия отметила, что в ходе реализации проекта был решен ряд задач государственного масштаба, направленных на обеспечение конкурентоспособности отечествен-

ного ОПК и гражданских отраслей промышленности.

В качестве примера выполненных в рамках проекта работ можно отметить создание четырех базовых версий отечественных программ 3D суперкомпьютерного моделирования: ЛОГОС, ЛЭГАК-ДК, ДАНКО+ГЕПАРД и НИМФА. Эти программы были 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. Они были сертифицированы и прошли процедуру государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ФИПС). Именно на основе указанных базовых версий стал разрабатываться затем отечественный многомодульный цифровой продукт инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования «Логос».

Другими весьма значимыми результатами реализации проекта являются создание мощной вычислительной базы, обеспечение возможности удаленного доступа к этой базе предприятий-соисполнителей, ряд виртуальных моделей конкретных технических систем. Последнее (вместе с созданными версиями ПО для комплексного имитационного 3D моделирования сложных технических систем на супер-ЭВМ) позволило с 2012 г. приступить к практическому внедрению разработанных отечественных суперкомпьютерных технологий (СКТ) в производственный процесс предприятий-соисполнителей проекта.

Важность работ по внедрению отечественных технологий суперкомпьютерного моделирования в ОПК и экономику страны была признана на государственном уровне. Решением Правительства РФ эти работы в 2016 г. были выделены в отдельное приоритетное технологическое направление. Ответственной организацией за указанное направление был назначен ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», а руководителем – Р. М. Шагалиев.

К настоящему времени усилиями специалистов математического отделения (совместно с руководством ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ГК «Росатом») на вебинарах в Москве (проводимых ежегодно в форме «Дня ЛОГОСА») научной и инженерной общественности РФ уже было представлено несколько тиражируемых цифровых программных модулей отечественного цифрового многомодульного продукта инженерного

анализа и суперкомпьютерного моделирования «Логос». Сегодня модули цифрового продукта «Логос» востребованы для решения задач космической отрасли, авиастроения, судостроения, автомобилестроения, атомной отрасли, ОПК и уже успешно применяются на более чем 100 предприятиях указанных отраслей промышленности и ОПК.

Работа по созданию новых модулей для цифрового продукта «Логос» продолжается. Так, планируется представить к сдаче модуль «Логос ПреПост» (ожидаемый выход модуля – 2023 г.); идут активные работы по таким специализированным модулям, как «Логос Атом» (ожидаемый выход модуля – 2023 г.); «Логос Аддитив» (ожидаемый выход модуля – 2023–2024 гг.); «Логос ЭМИ» (ожидаемый выход модуля – 2024 г.).

### **Центр компетенций и обучения**

Важным шагом на пути реализации проекта стало решение руководителей о создании в 2010 г. на базе математического отделения дочернего предприятия РФЯЦ-ВНИИЭФ – «Центра компетенций и обучения» (ЦКО). ЦКО возглавил С. В. Бурцев, а основными направлениями деятельности на начальном этапе его работы были такие, как:

- создание и внедрение на предприятиях и учреждениях РФ разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ компактных супер-ЭВМ терафлопсной производительности;

- разработка модулей отечественного многомодульного цифрового продукта инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования «Логос»;

- обучение специалистов внешних учреждений, организаций и предприятий использованию приобретенных в РФЯЦ-ВНИИЭФ компонентов суперкомпьютерных технологий в интересах заказчиков.

С первых же лет образования ЦКО вышел на уровень реализации создаваемых мелкосерийно в РФЯЦ-ВНИИЭФ 20–25 компактных супер-ЭВМ в год (рис. 10).

Основными заказчиками компактных супер-ЭВМ (КС-ЭВМ) стали образовательные организации (ИТМО, МГУ ГК, КФУ, КАИ и др.), учреждения РАН и предприятия различных высокотехнологичных отраслей промышленности РФ (ИПЛИТ РАН, ОИВТ РАН, НИИЭФА, ОКБ Сухого и др.).

Динамика поставок в организации КС-ЭВМ с нарастающим итогом по годам представлена на рис. 11.



Рис. 10. Компактная супер-ЭВМ терафлопсной производительности (1 Tflops)

С 2018 г. ЦКО возглавил А. Н. Петрик. Услуги ЦКО расширились. Был введен в строй вычислительный комплекс производительностью 50 ТФлопс, что позволило внедрить «облачное» предоставление услуг (в режиме удаленного доступа) к распределенному программному обеспечению. Кроме того, в ЦКО с площадей ИТМФ РФЯЦ-ВНИЭФ было перенесено мелкосерийное производство компактных супер-ЭВМ на отечественных компонентах. Сегодня ЦКО продолжает активно функционировать под руководством А. А. Воропинова.

#### Вычислительный центр коллективного пользования

На базе математического отделения был организован Вычислительный центр коллективного пользования предприятия (ВЦКП РФЯЦ-ВНИИЭФ). В настоящее время доступ к вычислительным ресурсам ВЦКП РФЯЦ-ВНИИЭФ предоставлен более 70 организациям РФ. ВЦКП оснащен уникальным отечественным прикладным и системным программным обеспечением собственной разработки, и он постоянно развивается с учетом требований заказчиков.

В 2017 г. специалисты математического отделения создали образец контроллера защиты модели FOBOS-100GL (В. В. Шубин), который

получил сертификат ФСТЭК России, как обеспечивающий техническую защиту информации за пределами контролируемой зоны, передаваемую по волоконно-оптическим линиям без ограничения скорости передачи и количества каналов. По итогам конкурса «100 лучших товаров России» (2018 г.) этот образец был признан лауреатом Всероссийского конкурса и получил официальное право в течение двух лет (2018–2019 гг.) сопровождаться логотипом конкурса. В настоящее время ведется разработка более перспективной модели контроллера защиты.

#### Относительно новые и перспективные разработки

Относительно новыми и перспективными направлениями работ отделения также являются:

- развитие метода «сглаженных частиц». Данный метод развивается в интересах численного моделирования процессов газовой динамики с теплопроводностью, упругопластики, неравновесных физических процессов по основной тематике, а также для моделирования процессов селективного лазерного спекания порошков в аддитивной технологии. Использование модели лагранжевых частиц в сочетании с эйлеровыми адаптивно-встраиваемыми сетками позволяют создавать безавостные расчетные технологии на высокопараллельных вычислительных системах;

- работа по созданию в интересах реализации проекта «Цифровой подводно-добычной комплекс», в котором осуществляется создание сквозной расчетной технологии для моделирования существующих и перспективных технологических процессов добычи, транспортировки и переработки природных углеводородов;

- по инициативе и при активном участии сотрудников отделения 08, рабочей группой, созданной в ГК «Росатом», была разработана «Кон-

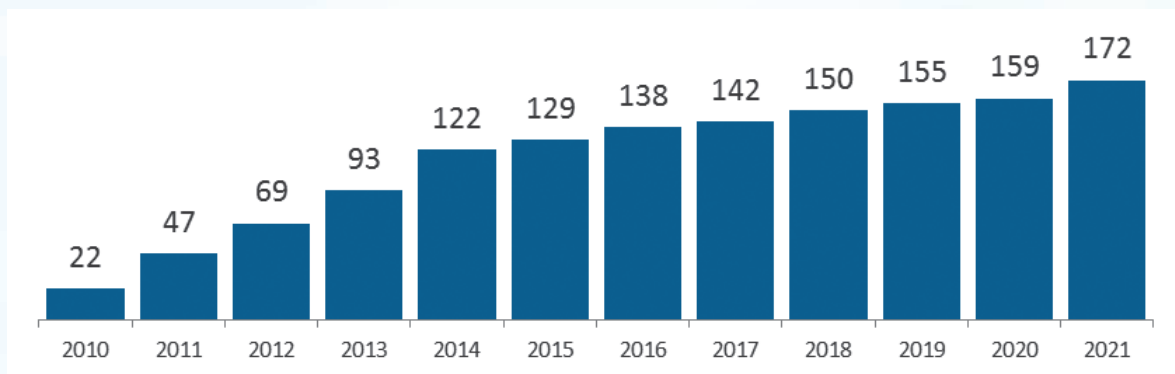


Рис. 11. Количество поставленных в организации КС-ЭВМ (с нарастающим итогом)

цепция эксафлопсных вычислений», утвержденная в 2012 г. ГК «Росатом». В работе над программой, кроме ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», принимали участие также ряд организаций из контуров ГК «Росатом» и РАН. В «Концепции» предлагалось использование ЭВМ с гибридными архитектурами (использование графических ускорителей);

– проводятся исследования в области квантовых вычислений для создания аналогового оптического вычислителя и цифровой фотонной вычислительной машины. Вместе с тем специалистами отделения получены крупные научно-технические и практические результаты в решении такой важнейшей задачи, как обеспечение импортонезависимости в области вычислительных систем в части разработки системы межпроцессорного обмена (СМПО). Силами специалистов математического отделения разработана и создана коммуникационная подсистема нового поколения – один из ключевых компонентов современных супер-ЭВМ. В настоящее время ведутся работы по улучшению характеристик коммуникационной системы, что в конечном счете позволит обеспечить возможность создания супер-ЭВМ сверхмощного класса производительности.

Коллективом специалистов отделения создан дистрибутив специализированной защищенной операционной системы «Арамид» для супер-ЭВМ. Сегодня ЗОС «Арамид» – это единственная в России сертифицированная во ФСТЭК операционная система для супер-ЭВМ. Она внесена в реестр отечественного ПО и уже эксплуатируется более чем на 200 супер-ЭВМ различных учреждений, организаций и предприятий России.

В настоящее время ведутся работы по созданию образцов универсальной и гетерогенной отечественных супер-ЭВМ среднего класса.

### Подготовка кадров

В рамках развития работы с вузами в части подготовки кадров, математическое отделение вносит свой вклад в создание ряда научно-образовательных центров и специализированных кафедр при ведущих вузах страны: МАИ, КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, ННГУ им. Н. И. Лобачевского, НГТУ им. Р. Е. Алексеева, НИЯУ МИФИ СарФТИ. На этих кафедрах уже подготовлено более 300 студентов. В интересах создания и развития математических методик для решения задач суперкомпьютерного моделирования физических процессов, а также

с целью привлечения квалифицированных молодых специалистов, математическое отделение ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ННГУ, а также на базе СарФТИ НИЯУ МИФИ в 2021 г. организованы 2 молодежных учебно-научных лаборатории.

В 2021 г. при ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на государственном уровне создан Национальный центр физики и математики (НЦФМ). В разработанной научной программе НЦФМ реализация нескольких разделов закреплена за математическим отделением. Это – создание национального центра исследования архитектуры супер-ЭВМ (в том числе на отечественных компонентах) и центра разработки фотонной вычислительной машины (ФВМ) в целях разработки макетов компонентов ФВМ, суперкомпьютерное моделирование на супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности. Реализацию указанных проектов специалисты отделения планируют провести поэтапно (ближайший этап – до 2024 г., перспективный этап – до 2030 г.). Работы будут выполняться в кооперации с ведущими организациями РАН и базовыми вузами Министерства образования.

Коллектив математического отделения, в составе которого трудятся 11 докторов наук, 73 кандидата наук, 4 лауреата Государственной премии, 11 лауреатов премии Правительства РФ и один член-корреспондент РАН, встречает свой юбилей с хорошим настроением на дальнейшую работу по решению стоящих перед ним важных научно-технических задач.

**ШАГАЛИЕВ Рашит Мирзагалиевич** –

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

**ЕГОРШИН Сергей Павлович** –

старший научный сотрудник ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ

**СМОЛЯКОВА Алла Валерьевна** –

начальник научно-исследовательской лаборатории ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ