

УДК 51(092)
MSC 01A60
обзорная статья

DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-2-98-113

О ВКЛАДЕ МАТЕМАТИКОВ ПЕРВОЙ ВЕЛИЧИНЫ В АТОМНЫЙ ПРОЕКТ СССР¹

Е. М. Богатов , В. П. Богатова ,

(Статья представлена членом редакционной коллегии Ю. П. Вирченко)

Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

в г. Губкине Белгородской области,

Губкин, 309180, Россия

Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал)

Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,

Старый Оскол, 309516, Россия

E-mail: embogatov@inbox.ru

Аннотация. Представлен вклад академиков М. В. Келдыша, С. Л. Соболева, члена-корреспондента академии наук Советского Союза А. Н. Тихонова и профессора Л. В. Канторовича в математическое обеспечение советского Атомного проекта 1948–1955 гг. Под руководством Соболева (расчётное бюро спецлаборатории атомного ядра при Академии наук) для получения урана-235 в промышленных масштабах разрабатывалась теория устойчивого функционирования комплекса каскадов и проводился его расчёт. Под началом Келдыша (расчётное бюро Института математики Академии наук) производились расчётно-теоретические работы по термоядерным бомбам «слойка» и «труба». Под руководством Тихонова (математическое бюро Геофизического института Академии наук) осуществлялся прямой расчёт атомного взрыва (плутониевый и урановый шары), а также энерговыделения водородной бомбы на основе уравнений газодинамики с лучистой теплопроводностью, рождением и переносом нейтронов. В расчётной группе Канторовича (бюро ленинградского отделения Института математики Академии наук) поначалу вычислялись критические массы заряда плутониевой бомбы. Позднее эта группа создала модель комптон-эффекта при взрыве термоядерной бомбы «труба» с учётом анизотропии и выполнила его расчёт.

Ключевые слова: Атомный проект СССР, вклад советских математиков в создание ядерного оружия, М. В. Келдыш, С. Л. Соболев, А. Н. Тихонов, Л. В. Канторович

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-011-00402.

Для цитирования: Богатов Е. М., Богатова В. П. 2022. О вкладе математиков первой величины в Атомный проект СССР. Прикладная математика & Физика. 54(2): 98–113. DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-2-98-113

ABOUT THE CONTRIBUTION OF THE FIRST MAGNITUDE MATHEMATICIANS TO THE SOVIET ATOMIC PROJECT

Egor Bogatov , Vera Bogatova 

(Article submitted by a member of the editorial board Yu. P. Virchenko)

Branch of National Research University of Science and Technology "MISIS" in Gubkin town of Belgorod Region

Gubkin, 309180, Russia;

Stary Oskol Technological Institute of National Research University of Science and Technology "MISIS"

Stary Oskol, 309516, Russia

E-mail: embogatov@inbox.ru

Received March, 21, 2022

Abstract. The contribution to the mathematical support of the Soviet Atomic Project of 1948–1955 by Academicians M. V. Keldysh and S. L. Sobolev, Corresponding Member of the Academy of Sciences A. N. Tikhonov, as well as Professor L. V. Kantorovich is presented. Under the leadership of Sobolev (calculation bureau of the special laboratory of the atomic nucleus at the Academy of Sciences), in order to obtain uranium-235 on an industrial scale, a theory of the stable functioning of the complex of cascades was developed and its calculation was carried out. Under the supervision of Keldysh (calculation bureau of the Institute of Mathematics of the Academy of Sciences), computational and theoretical work was carried out on thermonuclear bombs "puff" and "pipe". Under the leadership of Tikhonov (calculation bureau of the Geophysical Institute), a direct calculation of an atomic explosion (plutonium and uranium balls), as well as a hydrogen bomb, was carried out based on the equations of gas dynamics with radiant heat conduction, the birth and transfer of neutrons. In the calculation group of Kantorovich (bureau of the Leningrad branch of the Institute of Mathematics of the Academy of Sciences), the critical

¹Работа представляет собой расширенный и дополненный вариант докладов на Крымской осенней математической школе-симпозиуме КРОМШ-2021 [8] и на семинаре по дифференциальным и функционально-дифференциальным уравнениям Математического института им. С.М. Никольского 15.02.2022 [9].

masses of the plutonium bomb charge were initially calculated. Later, this group created a model of the Compton effect in the explosion of a thermonuclear bomb "pipe taking into account the anisotropy, and performed its calculation.

Keywords: Atomic project of the USSR, contribution of Soviet mathematicians to the development of nuclear weapons, M. V. Keldysh, S. L. Sobolev, A. N. Tikhonov, L. V. Kantorovich

Acknowledgements: The work is supported by RFBR, project No 20-011-00402.

For citation: Egor Bogatov, Vera Bogatova . 2022. About the contribution of the first magnitude mathematicians to the Soviet Atomic Project. Applied Mathematics & Physics. 54(2): 98–113. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-2-98-113

1. Введение. Вклад учёных-физиков в создание ядерного щита нашей страны в настоящее время хорошо известен (см., например, [23, 24, 11]). А вот вкладу математиков в историко-научной литературе уделено гораздо меньше внимания. После снятия грифа секретности с этой темы информационный вакуум стал понемногу заполняться воспоминаниями учёных, участвовавших в Атомном проекте (см., например, [38, 16]). Начиная с 1999 г. стали выходить многотомные сборники документов и материалов по Атомному проекту СССР [1]–[6], содержащие достоверные сведения об участии математиков и других специалистов в разработке ядерного и термоядерного оружия. Прочная документальная основа позволила пролить свет на взаимодействие математиков и физиков в рамках Атомного проекта [14] и сделать первые шаги в конкретизации роли математиков в нём [8]. Настоящее исследование является продолжением начатой работы, оно имеет следующие цели:

- выделение ключевых фигур, внесших наиболее существенный вклад в математическое обеспечение Атомного проекта;
- поиск ответа на вопрос, почему именно эти люди были приглашены в Проект;
- детализацию математического вклада каждого из основных участников Проекта;
- оценку результатов участия ведущих математиков в Проекте с точки зрения их дальнейшей карьеры и развития численных методов;
- оценку масштаба теоретических и прикладных математических исследований, проводимых в рамках Атомного проекта.

2. Старт работ по Атомному проекту. 28 сентября 1942 г. Государственный Комитет Обороны (ГКО) принял секретное распоряжение «Об организации работ по урану», которое обозначило начало работ по Атомному проекту в СССР. ГКО в принятом распоряжении обязал Академию наук СССР возобновить работы по использованию атомной энергии ядер урана [1, с. 330]. Временное руководство работами по указанной тематике в декабре 1942 г. было поручено И. В. Курчатову [1, с. 280]. Курчатов организовал группу физиков для обсуждения проблемы и разработки направления исследований. После победы в Сталинградской битве в феврале 1943 г. ГКО официально поручил И.В. Курчатову научное руководство выбранными направлениями работ. [1, с. 306]. На базе ЛФТИ в Казани была создана временная спецлаборатория атомного ядра АН СССР (позже Лаборатория № 2), которой было поручено срочно изучить проблему в целом и ответить на вопрос «о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива». 12 апреля 1943 г., в соответствии с постановлением ГКО, вице-президентом АН СССР было подписано распоряжение об организации Лаборатория № 2 АН СССР. Назначение И.В. Курчатова начальником Лаборатории № 2 было оформлено приказом ЛФТИ в августе 1943 г. [1, с. 321].

20.08.1945 г. при ГКО был организован Специальный комитет во главе с Л. П. Берией – заместителем Председателя Совета Народных Комиссаров СССР И. В. Сталина. На Специальный комитет была возложена организация всей деятельности по использованию атомной энергии в СССР: научно-исследовательских работ, разведки месторождений и добычи урана, создания атомной промышленности, атомно-энергетических установок, опытных образцов и серийного производства атомных бомб. Одновременно со Специальным комитетом было организовано Первое главное управление (ПГУ), которому была поручена задача непосредственного руководства научно-исследовательскими, проектными, конструкторскими организациями по использованию атомной энергии и промышленными предприятиями по производству атомных бомб.

Осуществлять Атомный проект СССР была призвана группа наиболее талантливых математиков: академиков и членов-корреспондентов АН СССР, докторов и кандидатов наук, аспирантов и студентов, специалистов без званий. Не имея возможности отразить участие всех вышеперечисленных математиков в одной статье², мы сосредоточимся на вкладе руководителей математических бюро Атомного проекта:

- академика Соболева;
- академика Келдыша;
- члена-корреспондента АН СССР Тихонова;
- профессора Канторовича,

внесших, по нашему мнению, наиболее весомый вклад³ в его математическое обеспечение.

Мы считаем необходимым привести ряд биографических сведений об указанных учёных, позволяющих лучше понять причины их включения в Атомный проект.

²Вклад математиков второй величины был частично проанализирован в работе [10].

³Этот факт косвенно подтверждается статусом полученных ими званий, премий и наград за участие в Атомном проекте (см. ниже).

3. О вкладе академика С. Л. Соболева. С. Л. Соболев известен математическому миру, как создатель обобщённых производных и пространств своего имени. Его участие в Атомном проекте по понятным причинам не получило широкой огласки.

В 1929 г. после окончания ЛГУ Соболев был направлен в теоретический отдел Сейсмологического института АН СССР. Уже в 1930 г. он написал четыре важных статьи по теории упругости и распространения волн в неоднородных средах. Одна из них была представлена на Первом Всесоюзном математическом съезде. С 1932 г. С. Л. Соболев начинает работать в математическом институте Академии наук СССР (МИАН) в отделе дифференциальных уравнений. В 1933 г. (в возрасте 25 лет) за выдающиеся заслуги в математике он был удостоен звания члена-корреспондента АН СССР. В 1934 г. С. Л. Соболева назначили заведующим отделом МИАН, а в 1939 году он был избран действительным членом Академии наук СССР [7, 15].

В самом начале войны Соболев стал директором МИАН и в сентябре 1941 г. ему пришлось заниматься эвакуацией математического института в Казань. В трудных условиях он занимался организацией работ по военной тематике, сам активно участвовал в исследованиях по увеличению точности артиллерийской стрельбы и бомбометания. Кроме того, в Казани Сергеем Львовичем было выполнено закрытое исследование⁴ по динамике вращающейся жидкости, связанное с методом центрифугирования для получения изотопов урана. Весной 1943 г. ГКО принял решение о возвращении в Москву из эвакуации академических институтов и основной части Лаборатории № 2. В этом же 1943 году Соболев заканчивает второе математическое исследование по качественной теории вращающейся жидкости [35], [7, с. 181]. В предвоенные годы Соболев С. Л. был известен как редкий специалист, умело сочетающий исследование в сфере уравнений математической физики с её приложениями в физике и механике. Сергей Львович получил фундаментальные результаты в теории уравнений с частными производными и функциональном анализе, которые вошли в золотой фонд мировой математики. Учитывая всё это, а также молодость и организаторские способности Сергея Львовича, и в связи со сложностью новых научных и технических задач было решено пригласить его в Лабораторию № 2 на должность первого заместителя И. В. Курчатова. В марте 1944 года Соболев оставляет должность директора МИАН и переходит на постоянную работу в Лабораторию № 2, где его избирают председателем Ученого совета [19].

В августе 1945 г. руководство Лаборатории № 2 отчиталось о том, что у них имеется достаточно данных для организации промышленного производства атомных взрывчатых веществ (урана-235 и плутония-239). При этом Соболев являлся научным руководителем в группах как по урану, так и по плутонию, организовывая и направляя работу вычислителей. Для получения урана-235 в промышленных масштабах была создана теория, основанная на использовании каскадов центрифуг (член-корреспондент АН СССР, физик И. К. Кикоин). Руководство расчётами промышленного комплекса указанных каскадов, его газодинамики, устойчивости и регулируемости каскадов, а также экономической целесообразности схем параллельной работы цепочек диффузных машин было поручено Соболеву [34, 321-322], [35, с. 76]. Отметим, что все расчёты огромного объёма выполнялись на трофейных электромеханических машинках «Мерседес» и логарифмических линейках. В этот период за исключительные заслуги перед государством академик С.Л. Соболев был отмечен двумя Государственными премиями и званием Героя Социалистического Труда.

Эксперименты по обогащению газообразного урана вместе с огромным числом разнообразных научных, технологических и организационных проблем начались в 1946-м г. В октябре 1947 г. академика Соболева вводят в состав Научно-технического совета ПГУ, состоявшего прежде из физиков и управленцев [2, с. 229]. В июне 1948 г. Совет Министров СССР обязывает «... организовать при Лаборатории № 2 закрытый семинар в составе акад. Ландау, акад. Петровского, акад. Соболева, чл.-корр. Тамма, чл.-корр. Харитона, чл.-корр. Зельдовича, чл.-корр. Тихонова, ... Возложить руководство семинаром на академика Соболева С.Л.» [2, с. 497].

Испытания первой советской атомной бомбы на Семипалатинском полигоне 29 августа 1949 г. были успешными. Большая группа наиболее отличившихся участников атомного проекта была награждена орденами. Сергей Львович Соболев получил в награду орден Ленина.

В середине 1949 г. Лаборатория № 2 была переименована в ЛИПАН – Лабораторию измерительных приборов Академии наук. Усилия Кикоина и Соболева, прошедших совместный путь от начала освоения газодиффузного метода разделения изотопов урана до его инженерно-технической проработки, были сфокусированы на производственной деятельности диффузионного завода. В другой группе (И. В. Курчатова) по разработке уран-графитового атомного реактора Сергей Львович с сотрудниками нашли точное значение граничных условий «задачи для чёрного стержня». Участвуя в проектировании заводской установки для получения тяжёлой воды (оксида дейтерия D_2O), Соболев написал заметку «Время установления равновесия в разделительной электролизной установке» [19, с. 347]. После завершения участия в Атомном проекте Сергей Львович продолжал работы по расчётам, связанным с мирным применением атомной энергии.

В разговорах с коллегами Соболев признавался, что он приобрел вкус к вычислительной математике, почувствовал ее исключительные возможности именно в годы работы в Лаборатории № 2. Осмысление теоретических основ вычислений, проводимых в рамках атомного проекта, привели Соболева к исследованиям в области теории алгоритмов. Он разработал понятие замыкания вычислительного алгоритма, анализируя эффективность того или иного приближённого метода [40]. В ряде случаев оказалось, что при увеличении числа итераций n можно говорить о предельном переходе в самом алгоритме решения (например, в методе сеток для уравнения Лапласа предельным процессом при уменьшении шага h является уравнение теплопроводности). Получается, что асимптотическое изучение свойств данного алгоритма (при больших n , малых h) может строиться на основе исследований этого предельного процесса. Существенное значение при этом имеет характер предельного перехода (так называемая регулярность и нерегулярность замыкания алгоритма). Если замыкание регулярно, то имеются основания ожидать

⁴По сведениям профессора А. Л. Скубачевского (РУДН), математические результаты этого исследования до сих пор полностью не рассмотрены.

устойчивости алгоритма. Подобное исследование было подробно проведено Сергеем Львовичем в работе [41], где он анализировал алгоритм решения интегральных уравнений Фредгольма.

Атомный проект обогатил научный и личностный потенциал Соболева. Он возглавил первую в нашей стране кафедру вычислительной математики механико-математического факультета МГУ и выступил инициатором создания Вычислительного центра МГУ (1952–1958 гг), вошедшего за короткое время в число самых мощных в стране. Применение ЭВМ для решения вычислительных задач стало одной из главных забот Соболева, с момента их появления в СССР. При решении задач вычислительной математики С. Л. Соболев широко использовал аппарат функционального анализа, уравнений с частными производными и теории функций [42]. Более того, задачи вычислительной математики он часто в своих работах представлял как задачи функционального анализа. В 50-е годы руководимый Сергеем Львовичем семинар кафедры вычислительной математики был одним из крупнейших центров притяжения, объединявших ученых нашей страны, специализировавшихся в области теории численных методов, программирования, кибернетики, разработки вычислительной техники [36].

Обобщая свой опыт участия в Атомном проекте, С. Л. Соболев выступил на III Всесоюзном математическом съезде с пленарным докладом «Некоторые современные вопросы вычислительной математики». В этом докладе он определил главные направления, послужившие основой развития вычислительной математики на длительный период. На секции функционального анализа того же съезда С. Л. Соболев, Л. А. Люстерник и Л. В. Канторович представили совместный доклад «Функциональный анализ и вычислительная математика» [43], в котором объединили имеющиеся у них результаты. По нашему мнению, участие Соболева и Канторовича в Атомном проекте послужило катализатором для рассмотрения новых задач и идей, вытекающих из взаимосвязи упомянутых разделов математики.

4. О вкладе академика М. В. Келдыша. В 1927 г. Мстислав Келдыш поступил в МГУ на математическое отделение. После его окончания в 1931 г. он был принят в Центральный аэрогидродинамический институт имени Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). Наибольший интерес для молодого Келдыша представляли вопросы гидродинамики и нестационарной аэродинамики. С 1934 г. Мстислав Всеволодович совмещает работу в ЦАГИ и МИАН. В сентябре 1934 г. он поступил в аспирантуру МИАН, и в 1935 г. без защиты диссертации ему присвоили ученую степень кандидата физико-математических наук.

В эти же годы в самолётостроении возникли серьезные проблемы, которые стали препятствием на пути развития скоростной авиации. При возрастании скорости самолёт начинало сильно трясти, и он рассыпался в воздухе – это явление назвали *флаттером*. При взлёте и посадке самолёта возникала другая проблема: переднее колесо трёхколёсного шасси могло внезапно сильно завибрировать и привести к катастрофе. Это явление самовозбуждения колебаний было названо *шимми*. В 1936 г. за большой цикл работ, посвящённый колебаниям авиационных конструкций, Келдыш получил степень кандидата технических наук и звание профессора по специальности «аэродинамика». В январе 1938 г. он защитил докторскую диссертацию по математике.

С 1939 г. имя ученого и его работы засекречены, поскольку в предвоенные и военные годы проблема вибрации в самолётостроении относилась к категории государственных задач особой важности. В 1941 году Келдыша назначают начальником отдела динамической прочности. Он руководил разработкой решения проблемы прочности самолетов – это вопросы флаттера, вибраций винтомоторных групп, усталости авиационных конструкций, прочности и шимми шасси и ряд других. Авиастроение всех передовых стран столкнулось с явлением флаттера раньше СССР, но именно у нас в стране, быстрее других, флаттер был преодолён в наиболее полном наборе всех его разновидностей. Это произошло благодаря работам М. В. Келдыша и его коллег. За научные работы по предупреждению разрушений самолетов ему (совместно с Е. П. Гроссманом) в апреле 1942 г. была присуждена Сталинская премия. Под руководством М. В. Келдыша были разработаны основы моделирования явления флаттера в аэродинамических трубах и методы его численного расчёта. За выдающиеся заслуги в области научно-исследовательских работ в авиации М. В. Келдыш был награжден орденом Трудового Красного Знамени (июнь 1943 г.). В сентябре 1943 г. его избрали членом-корреспондентом АН СССР по Отделению физико-математических наук, а в ноябре 1946 г. – академиком АН СССР [13, с. 13-15].

С 1942 г. по 1953 г. Келдыш являлся профессором МГУ. На физико-техническом факультете МГУ он заведовал кафедрой термодинамики и вел курс математической физики, на механико-математическом – читал лекции и руководил семинаром по теории функций комплексного переменного. В апреле 1944 г. в МИАН создали отдел прикладной механики, которым с июня 1944 г. по июнь 1953 г. заведовал (по совместительству) М. В. Келдыш. В 1946 г. он получил Сталинскую премию II степени за научные исследования в области теории и методов расчета автоколебаний самолетных конструкций.

Вернёмся к Атомному проекту. В него было одновременно вовлечено несколько институтов АН СССР помимо МИАН, в том числе Институт химической физики (ИХФАН) и Институт физических проблем (ИФПАН). Эти институты испытывали острую нехватку математиков-прикладников. Почти весь 1946-й год директор ИХФАН Семёнов Н. Н. добивался перевода Келдыша в свой институт, давая ему такую характеристику: «По отзывам всех руководящих математиков нашей страны профессор Келдыш является самым талантливым математиком молодого поколения (ему 34 года), к тому же имеющим опыт технических расчётов... Как только он овладеет новой областью, создастся возможность втягивания в проблему всех основных математических сил» [11, с. 182-183]. Но Келдыш, имевший серьёзные наработки по численным методам, был нужен не только ИХФАН. В конце 1946 г. в МИАН было образовано расчётно-математическое бюро, руководство которого было поручено М. В. Келдышу. В конце 1946 года с целью обеспечить быстрое развитие эксперимента и теории в области реакций на быстрых нейтронах (применительно к процессам ядерного взрыва) при ИХФАН был организован постоянно действующий семинар для обсуждения работы в указанном направлении в составе 37 человек, среди которых было три математика: С. Л. Соболев, М. В. Келдыш

и К. А. Семендяев⁵ [3, с. 800; с. 212]. В мае 1948 г. было решено приступить к разработке конструкции «сверхмощной» (термоядерной⁶) бомбы, после чего постановлением Совета Министров СССР расчётная группа МИАН была усилена до 39 человек. При этом её научное руководство было передано академику И.Г. Петровскому. В начале декабря 1946 г. М. В. Келдыш был назначен начальником Реактивного НИИ и его творческая энергия на какое-то время была перенаправлена на задачи, связанные с созданием реактивных двигательных установок для оснащения крылатых ракет. Мстислав Всеволодович, возглавив указанный научный Институт, реорганизовал его работу и чётко направил усилия его коллектива на создание теоретических основ ракетостроения и космонавтики [53].

К концу 1950 г. для ускоренной разработки термоядерных бомб возникла острая необходимость в усилении всех математических бюро, задействованных в Атомном проекте. Постановлением Совета Министров СССР от 9 мая 1951 г. Келдыш М. В. был утверждён председателем математической секции № 7 Научно-технического совета, *главным научным руководителем работ* по созданию конструкций быстродействующих вычислительных машин (БВМ) и разработке методов работы на них. Кроме того, Келдышу было поручено руководство организацией вычислительного центра ПГУ. В указанном постановлении также предписывалось:

- обязать ПГУ организовать расчетно-теоретические работы по термоядерной бомбе РДС-6Т в МИАН под руководством академика *Келдыша М.В.* параллельно работам, ведущимся в ИФПАН;
- утвердить академика *Келдыша М.В.* заведующим отделом прикладной математики (ОПМ) МИАН;
- обязать МИАН (т.т. Виноградова и *Келдыша*) создать в институте группу газодинамиков и математиков под руководством д. т. н. Дородницына А. А.

Келдышу и Дородницыну была поручена задача «Расчет основной газодинамической задачи о детонации цилиндрического заряда при заданном законе выделения энергии как функции давления и температуры без учета переноса энергии излучением и быстрыми частицами», в том числе:

- а) проведение качественного анализа установившегося режима распространения взрыва по цилиндрическому заряду;
- б) построение численных методов решения газодинамической задачи.

[5, с. 397-401].

Постановление Совета Министров СССР от 29.12.1951 г. обязало ПГУ сосредоточить в 1952 г. основные силы физиков, математиков и конструкторов на ускорении разработки изделия РДС-6С – термоядерной бомбы «слойки». В связи с чем следовало привлечь к участию в выполнении работ по ней Ландау, Зельдовича, *Келдыша*, Блохинцева и Колмогорова и поручить им ознакомиться с теоретическими и расчетными работами по РДС-6С, представив ПГУ свое заключение по ним.

30 января 1953 г. и повторно 29 мая 1953 г. Келдыш был назначен руководителем следующих работ:

1. Проверка уточненными методами устойчивости решения задачи о распространении детонации в цилиндрическом заряде.
2. Теория зажигания тяжелым горючим инициатора для РДС-6Т⁷.
3. Точный расчет возникновения детонации в цилиндрическом заряде от тритиевого инициатора с учетом передачи энергии частицами и квантами и переменной концентрации реагирующих веществ.

Задача об иницировании трубы заключалась в точном расчете процесса превращения сферической волны в стационарную, распространяющуюся в цилиндрической трубе. Только после решения этой задачи можно было с уверенностью сказать, что стационарный режим не только принципиально может существовать, но и практически может быть получен. В рамках этой задачи М. В. Келдыш вместе с Дородницыным являлись ответственными исполнителями: формулировали уравнения, выбирали начальные условия первого варианта расчета, программировали расчеты на электронной машине и осуществляли их проведение [5, с. 603-608]. Кроме этого, Келдыш был одним из соисполнителей темы «Разработка нестационарного метода расчета двумерных гидродинамических задач». В выпущенном отчёте о проведении расчёта двумерной (гидродинамической) задачи об осесимметричном движении газа с ударной волной впервые была описана матричная прогонка.

Главный конструктор КБ-11⁸ Ю. Б. Харитон так оценивал участие Мстислава Всеволодовича в решении атомной проблемы: «*Особенности таланта М. В. Келдыша, мне кажется, заключались в умении предвидеть дальнейший ход развития науки. Из самых тонких физических экспериментов он делал такие математические выводы, что, казалось, ему доступна сама сущность вещей...*» [52, с. 66-71].

Многообразии обязанностей и интересов М. В. Келдыша вызывает восхищение и удивление. Он успешно работал по четырём ведущим направлениям развития науки и техники того времени – ракетостроение, атомная проблема, вычислительная математика и создание ЭВМ [32]–[33]. Именно «победы на всех фронтах» привели к тому, что после 1955 г. в СССР уже работала первая атомная электростанция, появились ракеты, оснащенные атомными зарядами, было создано новое поколение более эффективных термоядерных бомб, росли количественно и качественно коллективы вычислителей, начали выпускаться первые ЭВМ [54, с. 102-107].

5. О вкладе члена-корреспондента академии наук СССР А. Н. Тихонова. В 1922 году в возрасте 15 лет Андрей Тихонов поступил на математическое отделение физико-математического факультета МГУ. Это отделение

⁵По нашему убеждению, Семендяев относится к *математикам второй величины* из числа участников Атомного проекта [10].

⁶Подробности создания термоядерных бомб см. в Приложении 1.

⁷Эта конструкция бомбы кратко называлась «труба»

⁸КБ-11 было создано при Лаборатории № 2 в апреле 1946 г. В его составе были НИИ, конструкторские подразделения, а с 1949 г. – заводы по производству атомных бомб.

объединяло в то время следующие специальности: математика, физика, механика, геофизика, астрономия. Для всех специальностей был общий четырехлетний курс, и студенты могли получить знания по весьма широкому кругу смежных дисциплин. Разделение по специальностям проявлялась в основном в курсах «по выбору» и теме дипломной работы. После защиты дипломной в 1927 г. Тихонов поступил в аспирантуру в НИИ математики и механики при МГУ, а после её окончания стал преподавать на кафедре математики физического отделения физмата МГУ. В том же 1930 г. А. Н. Тихонов был зачислен на должность ученого специалиста Гидрометеослужбы. С 1931 г. он стал работать учёным специалистом Государственного геофизического института [46, с. 5-12]. Его исследования в геофизическом институте были связаны с определением исторического климата земли, с вопросами мерзлотоведения. В простейшем приближении распространение температуры вглубь земли описывается уравнением теплопроводности на полубесконечном промежутке. А. Н. Тихонов показал, что решение задачи Коши в этом случае без условия ограничения роста решения на бесконечности не будет единственным. Одновременно он поставил и исследовал обратную задачу теплопроводности. Для учета влияния излучения на температурный режим земной коры А. Н. Тихоновым были изучены нелинейные краевые задачи для уравнения теплопроводности. Им была предложена редукция, сводящая эти задачи к нелинейным интегральным уравнениям типа Вольтерра. В 1936 г. Андрей Николаевич защитил докторскую диссертацию, и через год стал профессором МГУ и заведующим кафедрой математики на физическом факультете [22]. В 1937 г. был организован Институт теоретической геофизики АН СССР. В нём Тихонов начал работать по совместительству научным сотрудником, а затем заведующим отделом математической геофизики. В тот период работы А. Н. Тихонова были зачастую связаны с исследованием фундаментальных задач геофизики и электродинамики.

В 1939 году Тихонов был избран членом-корреспондентом Академии Наук СССР по отделению Математических и Естественных наук по специальности «геолого-географические науки» за основополагающие разработки по созданию и развитию электромагнитных методов изучения земной коры (в частности, для разведки полезных ископаемых). В начале войны (1941-43 гг.) он курировал геологическую разведку нефтяных месторождений в Башкортостане. В 1943 г. А. Н. Тихонов вернулся из эвакуации в Москву и продолжил работать на прежних местах [21].

Как уже упоминалось ранее, в Атомном проекте было задействовано несколько академических институтов. Проблема расчёта теоретической мощности ядерного взрыва обсуждалась на семинаре И. В. Курчатова в начале 1948 года. К этому времени уже были предложены упрощенные модели взрыва атомной бомбы, описываемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений для средних величин. Однако уточнение приближённой модели требовало развития численных методов, теория которых ещё не сложилась. Физикам требовалась помощь математиков, разрабатывающих указанную теорию. В этой связи постановлением Совета Министров СССР «О дополнительных заданиях по плану специальных научно-исследовательских работ на 1948 год» в институте Геофизики было организовано Бюро математических расчётов под руководством члена-корреспондента АН СССР А. Н. Тихонова в составе 30 человек. Для увязки теоретических и расчётных работ и контроля за выполнением заданий, предусмотренных настоящим Постановлением, было также предписано создать закрытый семинар при Лаборатории № 2 с участием А. Н. Тихонова [6, с. 121-122]. Именно на этом семинаре в начале 1948 г., по воспоминаниям его ученика Самарского, А. Н. Тихонов предложил провести прямой численный расчёт взрыва⁹ методом конечных разностей *на основе полных моделей физических процессов*, описываемых системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В то время ни теории, ни опыта практического применения разностных схем для сложных задач математической физики почти не было. Для физиков данное заявление было неожиданным и вызвало реплику Л. Д. Ландау о том, что такой расчёт явился бы «научным подвигом» [38, с. 215] по причине отсутствия достаточного опыта реализации разностных схем для сложных задач математической физики.

Ядерный взрыв представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов: деления ядер урана или плутония нейтронами, распространения образующихся при этом нейтронов, выделения энергии и её переноса по веществу, газодинамического разлёта сильно разогретого вещества. Математическая модель ядерного взрыва есть описание этих процессов системами нелинейных уравнений в частных производных. Методики аналитического решения таких уравнений не существовало, теория численных методов только начинала складываться. Предстояло выполнять чрезвычайно сложную и объёмную пионерскую работу, требующую совместных усилий физиков, математиков и вычислителей. При этом для расчетов можно было использовать только логарифмические линейки, арифмометры «Феликс» и позже клавишные машины «Мерседес».

Тихонов с Самарским начали работу по созданию разностного метода для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, моделирующую атомный взрыв. Система составлялась вместе с отделом Ландау, с учётом переноса нейтронов. Разностный метод был в то время обоснован только для линейных дифференциальных уравнений¹⁰ в эйлеровых координатах. Требовалось применить и обосновать сеточный метод для расчета полной системы нелинейных уравнений *в лагранжевых координатах* (это было абсолютно новым). Также нужно было построить эффективный алгоритм расчета, ориентированный на его реализацию примитивными вычислительными средствами [38, с. 217].

Во время создания атомной бомбы физики, по требованию ПГУ, давали математическим бюро расчётные задания, не объясняя их смысла и цели. Ни вычислители, ни научные сотрудники математических бюро не должны были знать, в решении каких задач они участвуют, что рассчитывают, с кем в параллели работают. Однако меньше чем за год математическое бюро Тихонова построило соответствующие методы и отладило алгоритм. К лету 1949 г. первый расчет полной системы уравнений взрыва плутониевого шара был осуществлен.

⁹Атомной бомбы.

¹⁰В частности, разностная схема решения уравнения Пуассона была обоснована в монографии Канторовича и Крылова [25].

На следующем этапе в бюро Тихонова от Ландау поступило более сложное задание: решить систему уравнений, описывающую взрыв шара с оболочкой из урана. Эта задача была гораздо труднее: на приведение ее к виду, пригодному для решения, и на разработку алгоритма потребовался месяц. Интерполяционную формулу энерговыделения в зависимости от параметров, для оценок готовящегося тогда атомного взрыва, составляли в группе Ландау, основываясь на расчётах бюро Тихонова. Совместно с А. А. Самарским А. Н. Тихоновым была создана теория однородных разностных схем, нашедшая важные и многочисленные практические приложения. За эти работы Андрей Николаевич был награжден Орденом Трудового Красного Знамени, а его сотрудники получили большие премии [46, с. 31-37].

В конце 1948 г. проводились работы по построению теории взрыва новых бомб на основе тяжёлого водорода в группе Я. Б. Зельдовича и И. Е. Тамма. На заседании Совета при Лаборатории № 2 от 02.12.1948 было заявлено, что «... объем расчетно-теоретических работ, необходимых для уточнения вопроса о возможности детонации дейтерия (работы группы Зельдовича), весьма велик, и поручил тов. Соболеву выяснить совместно с тт. Тихоновым и Петровским возможность применения математических приемов, которые позволили бы ускорить работу» [5, с. 169].

В начале 1950-го г. А. Д. Сахаров написал записку о работах над термоядерной бомбой «слойка» с использованием дейтерия, лития и обеднённого урана с заключением: «Гидродинамическая картина разлёта слойки при ядерном взрыве с учетом эффекта теплопроводности за счет диффузии световых квантов очень существенно входит в результаты подсчёта действия слойки¹¹. Для ее выяснения необходимы громоздкие численные математические вычисления». На основе этой записки 10 февраля 1950 г. И. В. Курчатов и Ю. Б. Харитон вместе с представителями администрации ПГУ написали письмо Л. П. Берии об архитектуре и происходящих реакциях в обеих упомянутых разработках. В ответ на это письмо вышло большое Постановление Совета Министров СССР «О работах по созданию РДС-6», где на Институт теоретической геофизики АН СССР (А. Н. Тихонова) было возложено проведение расчетных работ в 1950–1951 гг. по заданиям КБ-11 [5, с. 249, с. 284, с. 301].

Математическая модель бомбы РДС-6С описывается уравнениями газодинамики с лучистой теплопроводностью, рождением и переносом нейтронов за счет деления и термоядерных реакций. Существенную роль в модели играют уравнения состояния и физические характеристики процесса, например, коэффициенты поглощения света. Построение модели, апробация и расчёты по ней потребовали от сотрудников бюро Тихонова концентрации всех сил. Были составлены разностные уравнения, подготовлены детальные задания, уточнены физические характеристики, организованы расчёты [38].

В то время «Манхэттенский проект» опережал советский «Атомный проект»; в США под руководством Неймана уже были созданы ЭВМ. В СССР требовалось разработать в первую очередь экономичные и устойчивые алгоритмы счета для построения математической модели термоядерной бомбы. Ранее разработанные методы не годились для решения новой, на порядок более сложной задачи. А. Н. Тихонов и А. А. Самарский реализовали многие новые идеи по теории разностных схем, которые позже были изложены в работах [47]–[49]. Тихонов регулярно проводил в математическом бюро семинар с бывшими учениками, на котором обсуждались новые идеи, ход работы, возникающие трудности и полученные результаты. В частности, здесь был сформулирован и обсуждён общий принцип выполнения тех же законов сохранения на дискретном уровне для разностных схем, что и для исходной дифференциальной задачи, названный *принципом консервативности*.

Чтобы опередить США в создании термоядерной бомбы, надо было торопиться, но для ускорения темпов расчётных работ катастрофически не хватало вычислительной техники и кадров. В отчёте о работах по созданию бомбы РДС-6Т Технический совет при ПГУ, ознакомившись с представленными материалами (отчёты Ландау и КБ-11), отметил следующее:

В настоящее время на чисто вычислительных работах занято около 100 человек¹². При этом удается проводить решение только самых важных и первоочередных задач и то совершенно неудовлетворительными темпами. Совершенно не удается просчитывать ряд сходных вариантов, несколько отличных один от другого по числовым характеристикам, для отбора наилучшего варианта. Необходимо скорейшее увеличение числа математиков и расчетных работников в Математическом институте, в группе Ландау, в Институте теоретической геофизики и в КБ-11. Необходимо скорейшее создание универсальных математических машин и обеспечение средней математической механизации.

Отметим, что Совет Министров СССР отозвался на указанные острые проблемы (Постановление от 7 июня 1952 г.) и принял меры к их решению [5, с. 453].

Разработка математических методов детального расчета, выполненная по заданиям КБ-11 группами Л. Д. Ландау и А. Н. Тихонова, потребовала серьезной исследовательской и большой вычислительной работы. В ходе поиска оптимального варианта РДС-6С и методики расчётов было проведено 12 детальных расчетов термоядерных бомб. Количество произведенных при этом арифметических операций исчислялось многими десятками миллионов. Важно, что удалось выработать метод расчета, в котором неизбежно возникающие в громоздких вычислениях малые ошибки не накапливались и не приводили к существенной погрешности в итоговом результате. Это оказалось принципиальным и при применении ЭВМ [6, с. 20-27].

Испытание первой советской термоядерной бомбы РДС-6С 12 августа 1953 года на Семипалатинском полигоне подтвердило верность идей физиков, заложенных в конструкцию. Также это испытание показало, что математические модели и расчеты (проведенные до появления ЭВМ) с хорошей точностью соответствовали реальным процессам [5, с. 44].

31 декабря 1953 г. за создание термоядерной бомбы и новых конструкций атомных бомб Тихонову А. Н. присудили Сталинскую премию первой степени; через три дня ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

¹¹Принцип функционирования термоядерных бомб см. в Приложении.

¹²Не считая двадцати пяти физиков-теоретиков.

3 марта 1954 года Технический Совет КБ-11 решил принять все меры по форсированию работ по новой термоядерной бомбе РДС-6СД (газовый вариант). При этом окончательное решение о сравнительной эффективности того или иного варианта бомбы РДС-6СД было отложено до завершения точного расчета в математическом бюро А. Н. Тихонова.

Подчеркнём, что в математическом бюро А. Н. Тихонова своевременно шло развитие теоретических исследований на уровне, определяемом классом решаемых задач. Результатом явились построенные основы теории разностных схем для широких классов стационарных и нестационарных уравнений математической физики. По мере востребования были разработаны:

- теория устойчивости разностных схем [50];
- теория итерационных методов решения сеточных уравнений;
- общая теория регуляризации разностных схем [51];
- принципы суммарной или слабой аппроксимации многомерных задач.

Следует отметить, что предложенный А. Н. Тихоновым алгоритм решения некорректно поставленных задач оказался хорошо приспособленным для реализации на ЭВМ. Метод регуляризации Тихонова допускает применение для широкого класса задач; задачи об отыскании решения интегрального и операторного уравнения первого рода, обратной задачи теории потенциала и теплопроводности, задачи об аналитическом продолжении функции, задачи геофизической разведки полезных ископаемых, задачи оптической и нейтронной спектроскопии и многих других.

В ходе работ по созданию математических моделей и методов, разработанных для численных расчётов энерговыделения атомных и термоядерных бомб под руководством А. Н. Тихонова, вырос большой коллектив специалистов по прикладной математике [46].

6. Вклад профессора Л. В. Канторовича. В возрасте 14 лет Л. В. Канторович поступил в ЛГУ. На втором курсе он принял активное участие в семинарах, которыми руководили Б. Н. Делоне, В. И. Смирнов и Г. М. Фихтенгольц. Окончив университет в 1930 г., Леонид Витальевич читал лекции в разных вузах Ленинграда (в том числе ЛГУ), сочетая преподавание с интенсивными научными исследованиями.

По окончании университета в 1930 г. Леонид Витальевич преподавал в высших учебных заведениях Ленинграда – ЛГУ, Высшем военном инженерно-техническом училище Военно-Морского Флота (ВВИТУ ВМФ) и Ленинградском институте инженеров промышленного строительства. Продолжая интенсивно заниматься научными исследованиями, уже в 1932 г. он стал профессором Ленинградского института инженеров промышленного строительства и доцентом ЛГУ. В 1934 г. Канторович получил должность профессора ЛГУ, а в 1935 г. – учёную степень доктора физико-математических наук (без защиты диссертации) [31].

Видимо, преподавание в вузах, выпускающих инженеров, пробудило его интерес к прикладным задачам и приближённым вычислениям. В 1931 г. Леонид Витальевич стал посещать семинар В. И. Смирнова по приближённым методам высшего анализа и разрабатывать методы приближённого решения задач математической физики. В 1936-м году вышла монография Л. В. Канторовича в соавторстве с В. И. Крыловым «*Методы приближённого решения дифференциальных уравнений в частных производных*» [25]. Эта монография имела большой успех, выдержав шесть переизданий.

Во время войны Л. В. Канторович служил начальником кафедры математики Высшего военного инженерно-технического училища Военно-Морского Флота (ВВИТУ ВМФ) в звании майора. С этим училищем он провёл годы войны в Ярославле. В это время Канторович написал оригинальный курс «Теория вероятностей» (1946), предназначенный для военных учебных заведений и отражающий специфические военные приложения этой науки.

К этому времени набирал свои обороты советский Атомный проект, в который также оказался вовлечённым и Канторович. В Постановлении Совета Министров СССР от 10.06.1948 г. «В целях обеспечения теоретических и расчётных работ, выполняемых для Лаборатории № 2», в частности, поручалось:

- Министерству вооружённых сил СССР освободить профессора Канторовича от работы в Высшем военном-морском инженерном училище ... и демобилизовать его из рядов ВМФ;
- в двухнедельный срок организовать в ЛОМИ¹³ расчётную группу в количестве до 15 чел., возложив руководство этой группой на профессора Канторовича [2, с. 496-497].

В своё математическое бюро (расчётную группу) Леонид Витальевич начал набирать выпускников математического факультета ЛГУ из послевоенного выпуска. По воспоминаниям члена этой расчётной группы В. Н. Кублановской, сначала это было пять человек в ЛОМИ и три на машинно-счётной станции. Первый послевоенный выпуск был небольшим, почти всех математиков удалось собрать в расчётную группу. Специализация у выпускников была разная: геометрия, теория чисел, функциональный анализ, теория функций комплексного переменного. Из Москвы привозили определенные задания, в которых указывался строго определенный срок их выполнения. Решали интегральные или интегро-дифференциальные уравнения. Что именно считалось, никому не сообщалось, и только впоследствии узнали, что расчеты велись для атомной бомбы, но без конкретики. Даже параметры уравнений были «строго секретными» [17]. Расчеты велись вручную – на «Мерседесах» и «Рейнметаллах» с использованием восьмизначных таблиц, купленные в США. В них приводились все функции, вплоть до интегрального логарифма. Примерно через год наладилась работа машинно-счётной станции. Первая задача группы Канторовича состояла в расчёте критической массы заряда атомной бомбы (с математической точки зрения задача сводилась к вычислению собственных значений сингулярных интегральных операторов). Сначала считали критическую массу для шара, потом потребовался расчет для цилиндра.

¹³ Ленинградское отделение МИАН.

В процессе создания термоядерной бомбы в КБ-11 пришло понимание чрезвычайной сложности решаемых задач и необходимости корректировки плана соответствующих расчётно-теоретических работ. В результате в этот план (утверждённый Советом Министров СССР 9 мая 1951 г.) было, среди прочего, включено построение приближенных формул для изменения энергии квантов при однократном рассеянии на электронах в зависимости от температуры электронов и энергии квантов. Исполнителями были назначены Ландау (ИФПАН) и Канторович (ЛОМИ).

К середине октября 1951 г. была принципиально определена конструкция и рассчитано действие заряда, предназначенного для подрыва термоядерной бомбы РСД-6С. Для большей надёжности планировался ряд необходимых теоретических и математических исследований. В частности, сложные теоретические исследования, порученные группе Н. Н. Боголюбова (КБ-11), было решено форсировать. Этой группе должна быть обеспечена возможность опираться на расчеты математического бюро Л. В. Канторовича [5, с. 422].

После подрыва 12 августа 1953 года бомбы модели РСД-6С «слойки» основные научные силы участников Атомного проекта СССР направлены на создание дейтериевой термоядерной бомбы РСД-6Т «трубы» (она работала на принципе детонации жидкого дейтерия с протеканием термоядерных реакций). При реакции дейтерия образуются тритий и гелий-3, которые сами вступают во вторичную реакцию с образованием быстрых частиц (нейтронов и протонов). Отличительной особенностью РСД-6Т является протекание реакций при температуре до ста миллионов градусов, при которой вещество не находится в равновесии с излучением. Испускаемое электронами тормозное излучение является основным видом теплопотерь. В дальнейшем это излучение при рассеянии его электронами дополнительно отнимает от них тепло. Последний из перечисленных процессов получил название *комптонизации* [16].

Расчёт комптон-эффекта при заданном распределении температуры электронов было поручено выполнить к концу 1952 года учёным Померанчуку Ю. Я. (Лаборатория № 3) и Канторовичу Л. В. (ЛОМИ). В плане расчётно-теоретических работ по модели РСД-6Т на вторую половину 1953 г. Канторовичу и Кронроду было поручено разработать приближенный метод учета анизотропии в расчете комптон-эффекта при заданном гидродинамическом поле и точный метод расчёта комптон-эффекта с полным учетом анизотропии при заданном гидродинамическом поле [5, с. 653], [20].

Работая в Атомном проекте, Канторович пришел к убеждению о необходимости поставить вычислительные процессы на прочный теоретический фундамент. К концу 1940-х он осознал, что «идеи и методы функционального анализа могут быть использованы для построения и анализа эффективных практических алгоритмов решения математических задач с таким же успехом, как для теоретического исследования этих задач» [27, с. 89]. В 1948 году в журнале Успехи математических наук по этому поводу вышла его обзорная 96-страничная статья «Функциональный анализ и прикладная математика» [27], за которую в 1949 г. Канторович был награжден Сталинской премией. Развивая результаты статьи [27], к 1956 он подготовил новую работу «Приближённое решение функциональных уравнений» [28].

Потребность в решении трудоёмких вычислительных задач в контексте Атомного проекта побудила Канторовича внести свой вклад в развитие вычислительной техники и программирования. Он предложил остроумные алгоритмические и структурные решения, которые стали основой оригинальных вычислительных устройств. К концу 50-х годов под руководством Л. В. Канторовича были разработаны релейные клавишные вычислительные машины «Вятка» и «Вильнюс». Эти КВМ сыграли важную роль в автоматизации вычислительных работ [18]. В те же годы он обратился к формам интеллектуальной деятельности человека, в частности, вопросам автоматизации программирования. В работе «Об одной математической символике, удобной при проведении вычислений на машинах» [29] Леонид Витальевич предложил принципы, которые получили продолжение в работах отечественных и зарубежных авторов (подробности см., например, в [39]).

В 1963–1965 гг. в Институте математики Сибирского отделения АН СССР под руководством Л. В. Канторовича был разработан специализированный процессор с роторным принципом реализации массовых арифметических операций (авторское свидетельство 172567 от 7 мая 1965 г.). Скорость выполнения операции этого процессора ограничивалась только быстродействием оперативной памяти. Смелая идея использования проблемно-ориентированных процессоров материализовалась в перспективное направление вычислительной техники [30].

7. Заключение. Трудности, стоявшие перед создателями ядерного оружия, усугублялись крайне ограниченными сведениями о физической природе явлений, сопровождающих протекание ядерных процессов. Важным методом познания особенностей ядерного взрыва было его математическое моделирование с последующими расчетами по построенным физико-химико-математическим моделям. В процессе работы модели совершенствовались, улучшались и методы расчетов. Наиболее распространённые многомерные задачи, решаемые в рамках Атомного проекта, сводились к уравнениям вида:

$$A \frac{\partial V}{\partial t} + B \frac{\partial V}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial y} + DV = F,$$

где B, C, F – заданные матрицы; V – вектор-функция, D – линейный или нелинейный матричный оператор [45, с. 270]. Построение указанных моделей осуществлялось совместными усилиями физиков, химиков и математиков, продемонстрировавших поразительную силу сотрудничества наук.

Наиболее существенный вклад в математическое обеспечение проекта был внесён С. Л. Соболевым, М. В. Келдышем, А. Н. Тихоновым и Л. В. Канторовичем. Они были приглашены в проект в силу нескольких причин:

- все перечисленные являлись крупными математиками, имеющими опыт работы в прикладных областях, в том числе оборонного характера;
- они хорошо зарекомендовали себя на руководящих должностях;

- эти учёные обладали подходящими личностными свойствами: работоспособностью, ответственностью, целеустремлённостью и т. п.

Каждый из перечисленных участников, за исключением Келдыша (перегруженного организационной работой), проводил глубокие исследования по темам, связанным с работой в проекте. У Соболева это были изыскания в области теории алгоритмов и кубатурных формул, Тихонов разрабатывал теорию разностных схем. Канторович проводил анализ приближённых методов в рамках функционального анализа, а также проектировал вычислительные машины и процессоры. Их результаты впоследствии получили мировое признание.

Участие в Атомном проекте безусловно повысило авторитет учёных-математиков в научном сообществе и их социальный статус. В этом определённую роль сыграло их награждение орденами и медалями, также большие зарплаты и премии (премии руководителей математических бюро по результатам работ составили 100 тысяч рублей при средней месячной зарплате в СССР в те годы около 650 рублей). Кроме того, математики-руководители расчётных групп позиционировались по окончании проекта, как «проверенные кадры» в самых высоких кругах, что позволило им занимать ключевые позиции в других местах (Келдыш – руководитель космической программы; президент АН СССР, Соболев – директор Института математики Сибирского отделения АН СССР, Тихонов – декан факультета ВМК МГУ, позднее директор ИПМ АН СССР, Канторович – создатель математико-экономического отделения СО АН СССР; Нобелевский лауреат).

Результатом участия математиков в Атомном проекте явилось также следующее:

- научный потенциал Атомного проекта и опыт математического моделирования был использован в космическом проекте;
- усилилась роль математики и математиков в разработке сложных систем;
- были созданы новые факультеты (ВМиК МГУ и т. п.), кафедры и направления подготовки специалистов (например, прикладная математика).

Обобщение опыта проведения масштабного вычислительного эксперимента позволило создать новые направления в математике:

- теорию алгоритмов;
- теорию разностных схем;
- теорию регуляризации;
- кибернетику;
- прикладную математику.

Необходимость численного решения многомерных нелинейных задач вызвала революцию в области вычислительной математики. Были намечены принципиально новые возможности приложений математики к разработкам оптимальных технических конструкций. В результате общенаучное значение вычислительной математики изменилось коренным образом. По признанию физиков, математические расчеты не только позволяли понимать эксперимент, но и зачастую вскрывали явления, которые невозможно усмотреть экспериментально. Таким образом, математическое моделирование резко повышало темпы технического прогресса.

Благодарность. Авторы выражают благодарность профессору Вл. П. Визгину (ИИЕТ РАН, г. Москва) за знакомство с рукописью и полезные замечания, а также участниками семинара 15.02.2022 по дифференциальным и функционально-дифференциальным уравнениям Математического института им. С. М. Никольского за продуктивные обсуждения.

Приложение

Некоторые подробности создания водородной бомбы в СССР

Заявление Президента США от 31 января 1950 года о продолжении работ над всеми видами ядерного оружия, включая водородную бомбу, стимулировало неотложные меры со стороны Правительства СССР. 26 февраля 1950 года Советом Министров СССР было принято постановление о создании водородной (термоядерной) бомбы. Советская разведка обеспечивала информацией руководство СССР о работах в США над созданием указанной бомбы, благодаря чему И. В. Курчатов имел сведения о технологии её изготовления в некоторых подробностях. 21.04.1949 г. И. В. Курчатов в докладе Л. П. Берии писал, что теоретически нельзя исключить возможность использования дейтерия для резкого усиления взрыва атомной бомбы. В этом направлении у нас были сделаны два конструктивных предложения. В обоих для зажигания больших количеств дейтерия, окружающего обычную атомную бомбу, предполагалось использовать второй тяжелый изотоп водорода – тритий (H^3), добываемый в уран-графитовом котле. Сотрудники ФИАН А. Д. Сахаров и В. Л. Гинзбург предложили (1950 г.) изготовить многослойный заряд для атомной бомбы [5, с. 192]. Принцип действия проектируемого многослойного заряда заключается в следующем. Плутониевый заряд, служащий для инициирования всего изделия, помещается в центре системы из перемежающихся слоев природного урана и легкого материала, состоящего из смеси дейтерида и тритида лития-6. После обжаривания всей системы сферической детонационной волной в плутонии протекает цепная реакция и под действием развивающейся при этом высокой температуры в легком материале возникает термоядерная реакция: $D + T = He + n$. При этом образующиеся при реакции нейтроны имеют энергию 14 мегаэлектронвольт. Эти быстрые нейтроны вызывают деление ядер урана, вследствие чего выделяющаяся в многослойном заряде полная энергия в расчете на один израсходованный атом T возрастает примерно в 5 раз (с 17 до 85 мегаэлектронвольт). Находящийся в легком материале литий-6, взаимодействуя с нейтронами, образует дополнительное количество трития в результате реакции $Li^6 + n = T + He$, усиливая тем самым первичную термоядерную реакцию и увеличивая выделение энергии при взрыве [5, с. 333]. В докладной записке И. В. Курчатова и др., направленной Л. П. Берии от 14.04.1952 г., сообщалось:

- Разработаны методы расчета процессов, протекающих во время работы многослойного заряда (МЗ), в частности процесса обжигания МЗ, процесса перемешивания легких и тяжелых слоев, процесса диффузии нейтронов в МЗ.
- Проведены расчеты действия МЗ путем интегрирования системы уравнений движения, теплопроводности, кинетики ядерных реакций, диффузии и размножения нейтронов.
- На основе экспериментальных исследований построено уравнение состояния гидрида лития. Экспериментально исследовано обжигание многослойных систем взрывом. Показано, что расчеты удовлетворительно описывают прохождение ударных волн через многослойную систему.
- Произведено определение основных ядерных констант, необходимых для расчета эффективности изделия¹⁴ (сечение реакции $T + D$, сечение деления урана-238 нейтронами с энергией 2 и 14 мегаэлектронвольт, сечение реакций $n + Li^6 = T^3 + He^4$ или $He^6 + p$ и т. д.)
- Посредством ядерно-физического исследования моделей различных типов произведено определение коэффициента использования нейтронов, т. е. количество делений урана-238, вызываемых в среднем одним нейтроном с энергией 14 МэВ, образовавшимся в результате реакции $T + D^5$.
- На основе произведенных расчетов и экспериментов разработана конструкция из легких (дейтерида и дейтерида-тритида лития-6) и тяжелых (урана) слоев, перемежающих легкие.
- Разработана конструкция заряда из взрывчатых веществ в габаритах изделия РДС-7, обеспечивающая необходимое обжигание и отвод выделяемого тритием тепла.
- Разработана технология получения основных материалов, необходимых для изготовления водородной бомбы: трития и лития-6, и технология изготовления соединения трития и дейтерия с литием-6.
- Разработана технология изготовления деталей из тритида-дейтерида и лития-6, и деталей крупного размера из урана-238 [6, с. 333].

В итоге 12 августа 1953 года испытанием первой советской водородной бомбы РДС-6С СССР опередил США более чем на полгода.

17 октября 1953 г. А. Д. Сахаров с Я. Б. Зельдовичем передали И.В. Курчатову записку с предложением новой конструкции и новым принципом окружения атомной бомбы: в полости находится газ D^2 под давлением 150 атмосфер, уран и сферические оболочки из Li^6D , предполагая в этой конструкции протекание процессов, которые никогда ранее не были проверены экспериментально и не исследовались теоретически:

1. Лучистый теплообмен в полости сложной формы.
2. Лучистый теплообмен в продуктах взрыва первичного изделия.
3. Сжатие урана и Li^6D при давлениях в сотни миллионов атмосфер.
4. Диффузия нейтронов от первичного изделия.
5. Процесс атомно-водородного взрыва в системе уран - Li^6D [6, с. 377].

Экспертная комиссия согласилась с тем, что конструктивная схема изделия РДС-27 близка к конструктивной схеме испытанного изделия РДС-6С и также близка к оптимальной в данном габарите среди изделий, работающих на принципе многослойного заряда. Комиссия отметила важное преимущество изделия РДС-27 перед изделием РДС-6С, а именно – отсутствие в заряде трития, что, кроме экономичности, намного облегчает вопросы технологии изготовления и эксплуатации изделия, связанные с радиоактивностью трития.

6 ноября 1955 г. на полигоне № 2 Министерства обороны СССР успешно испытана водородная бомба РДС-27. По своим данным (прочность конструкции, вес) изделие РДС-27 могло быть использовано как в виде авиабомбы, так и в качестве спецзаряда трансконтинентальной баллистической ракеты.

22 ноября 1955 г. испытанием более совершенной водородной бомбы двухступенчатой конструкции РДС-37 (значение тротилового эквивалента 1,76 млн тонн) стало ключевым моментом в развитии ядерной программы СССР, открывшим перспективу нескольким поколениям термоядерного заряда с высокими мощностными характеристиками [6, с. 416; с. 422].

Список литературы

1. Атомный проект СССР: документы и материалы. 1998. Под общ. ред. Л. Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. I (1), 432.
2. Атомный проект СССР. Документы и материалы. 1999. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. II(1), 737.
3. Атомный проект СССР. Документы и материалы. 2007. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. II(6), 897.
4. Атомный проект СССР. Документы и материалы. 2007. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. II (7), 697.
5. Атомный проект СССР. Документы и материалы. 2009. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. III(1), 737.

¹⁴Так именовались бомбы в официальных документах Атомного проекта.

6. Атомный проект СССР. Документы и материалы. 2009. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: Наука, Физматлит. III(2), 601.
7. Бицадзе А. В., Канторович Л. В., Лаврентьев М. А. 1968. Сергей Львович Соболев (к шестидесятилетию со дня рождения). Успехи математических наук, 23:5(143): 177-186.
8. Богатов Е. М. 2021. Атомный проект СССР – кузница кадров Академии наук (отделение математики). Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2021. Симферополь: ПОЛИПРИНТ: 110.
9. Богатов Е. М., Богатова В. П. О вкладе математиков в Атомный проект СССР [Интернет-ресурс]
URL: http://m.mathnet.ru/php/seminars.phtml?option_lang=rus&presentid=33937 (дата обращения: 08.04.2022)
10. Богатов Е. М., Коренев А. В., Михайлов И. С. 2022. О вкладе математиков второй величины в Атомный проект СССР. Материалы 12-й Международной научной конференции МОЛОДЕЖЬ И XXI ВЕК – 2022. В 4-х томах. Отв. редактор М. С. Разумов. Курск, 1: 366-368.
11. Богуненко Н. Н., Пелипенко А. Д., Соснин Г. А. 2005. Герои атомного проекта. Федеральное агентство по атомной энергии. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 566.
12. Брушлинский К. В., Езерова Г. Н., Забродин А. В., Келдыш С. М. 2002. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 398.
13. Брушлинский К. В. 2011. Строитель советской науки. 100 лет со дня рождения Мстислава Келдыша. Наш современник. 2: 185-190.
14. Визгин В. П. 2011. Взаимодействие физиков и математиков в советском атомном проекте (1940-1950-е гг.). Историко-математические исследования : 53–76.
15. Вишик М. И., Люстерник Л. А., 1959. Сергей Львович Соболев (к пятидесятилетию со дня рождения), Успехи математических наук. 14:3(87): 203-210.
16. Владимиров В. С. 2009. Математика и создание первых образцов атомного оружия. К 60-летию взрыва первой атомной бомбы. Атомная стратегия. 05(42): 27-40.
17. Владимиров В. С., Кублановская В. Н. 2002. Вычисления для атомного проекта. Леонид Витальевич Канторович: человек и учёный. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 153-160.
18. Даугавет О. К., Романовский И. В. 2012. О деятельности и работах Л.В. Канторовича в области программирования. Журнал Новой экономической ассоциации. М., 1(13): 185-190.
19. Демиденко Г. В. 2008. К столетию со дня рождения Сергея Львовича Соболева. Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 8(4): 3-12.
20. Дмитриев А. Л., Иванова Е. А. 2002. К 90-летию со дня рождения Л. В. Канторовича. Экономическая наука современной России. 3: 124-127.
21. Еругин Н. П., Ильин В. А., Самарский А. А., Свешников А. Г. 1981. Андрей Николаевич Тихонов (к 75-летию со дня рождения). Дифференциальные уравнения, 17(10): 1731-1737.
22. Ильин В. А., Свешников А. Г. 1966. Андрей Николаевич Тихонов (к 60-летию со дня рождения). Дифференциальные уравнения. 2(10): 1408-1412.
23. История советского атомного проекта: Документы, воспоминания, исследования: вып. 1 / отв. ред. и сост. В. П. Визгин. - М.: Янус-К, 1998, 392.
24. История советского атомного проекта. Документы, воспоминания, исследования. Вып. 2 / Ред. В. П. Визгин. СПб.: Изд. РХГИ, 2002: 413–488.
25. Канторович Л. В., Крылов В. И. 1936. Методы приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных. М.-Л., ОНТИ, 528.
26. Канторович Л. В., Крылов В. И. 1949. Приближенные методы высшего анализа. Л., М.: ГИТТЛ: 696.
27. Канторович Л. В. 1948. Функциональный анализ и прикладная математика. Успехи математических наук, 3:6(28): 89–185.
28. Канторович Л. В. 1956. Приближённое решение функциональных уравнений. Успехи математических наук, 11:6(72): 99–116.
29. Канторович Л. В. 1957. Об одной математической символике, удобной при проведении вычислений на машинах. Доклады АН СССР, 113:4: 738–741.
30. Канторович В. Л., Кутателадзе С. С., Фет Я. И. (Ред.). 2002. Леонид Витальевич Канторович – человек и учёный. Новосибирск: Издательство Института математики, 1:543.
31. Канторович Леонид Витальевич (1912-1986): Биобиблиографический указатель. 2012. Ред. Кутателадзе С.С. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 204.
32. Келдыш М. В. 1985. Избранные труды. Математика. отв. ред. Бабенко К. И., Боголюбов Н.Н., Ченцов Н.Н.. М.: Наука, 447.
33. Келдыш М. В. 1985. Избранные труды. Механика. Отв. ред. Бабенко К.И., Свищев Г.П., Ченцов Н.Н., М.: Наука, 567.

34. К исследованию феномена советской физики 1950–1960-х гг. Социокультурные и междисциплинарные аспекты. 2014. Сост. и ред. В. П. Визгин, А. В. Кессених и К. А. Томилини. СПб.: РХГА, 560.
35. Крайнева И.А. 2019. Академик Сергей Львович Соболев в советском атомном проекте. Гуманитарный вектор. 14(6):72-80.
36. Кутателадзе С. С. 2008. Соболев из школы Эйлера. Сибирский математический журнал, 49(5): 955-985.
37. Мстислав Всеволодович Келдыш (к семидесятипятилетию со дня рождения). 1986. Успехи математических наук, 41:3(249): 209–212.
38. Самарский А. А. 1997. Прямой расчет мощности взрыва. Наука и общество: история советского атомного проекта (40-50 годы). Труды международного симпозиума ИСАП-96. М.: ИздАТ: 214-222.
39. Самокиш Б. А. 2012. Л.В. Канторович и вычислительная математика. Журнал Новой экономической ассоциации. М., 1 (13): 181–185.
40. Соболев С. Л. 1955. Замыкание вычислительных алгоритмов и некоторые его применения. М.: АН СССР: 30.
41. Соболев С. Л. 1956. Некоторые замечания о численном решении интегральных уравнений. Известия АН СССР. Серия математическая, 20:4, 413-436.
42. Соболев С. Л. 2003. Избранные труды. Уравнения математической физики. Вычислительная математика и кубатурные формулы. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, Филиал «Гео» Изд-ва СО РАН, 1, 692.
43. Соболев С. Л., Канторович Л. В., Люстерник Л. А. 1956. Функциональный анализ и вычислительная математика. Труды III Всесоюзного математического съезда. М., 2; 43.
44. Соболев Сергей Львович (1908-1989). Биобиблиографический указатель. 2008. Ред. и авт. вступ. ст. С. С. Кутателадзе. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во Института математики. 150.
45. Софронов И. Д. 2005. Математическое моделирование во ВНИИЭФ. Историко-математические исследования. Вторая серия. 9: 265-281.
46. Тихонова А. А., Тихонов Н. А. 2004. Андрей Николаевич ТИХОНОВ. Серия «Выдающиеся ученые физического факультета МГУ», VIII. М.: Физический факультет МГУ. 124.
47. Тихонов А. Н., Самарский А. А. 1956. О разностных схемах для уравнений с разрывными коэффициентами. Доклады АН СССР. 108(3): 393-396.
48. Тихонов А. Н., Самарский А. А. 1958. Об однородных разностных схемах. Доклады АН СССР. 122(4): 562–565.
49. Тихонов А. Н., Самарский А. А. 1959. О сходимости разностных схем в классе разрывных коэффициентов. Доклады АН СССР. 124(3):1529–1532.
50. Тихонов А. Н., Самарский А. А. 1963. Об устойчивости разностных схем. Доклады АН СССР. 149(3): 529-531.
51. Тихонов А. Н. 1963. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации. Доклады АН СССР. 151(3): 501-504.
52. Трутнев Ю. А. 2002. Келдыш М. В. и его коллектив в решении атомной проблемы. В кн. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука: 66-71.
53. Ученый с широким кругозором, умеющий мечтать: к 100-летию со дня рождения академика М. В. Келдыша. Исторический архив. 2011. 1: 3–32.
54. Ченцов Н. Н. 1991. Всемирно известный, всемерно засекреченный. Наука и жизнь. 2: 102-107.

References

1. Atomnyj proekt SSSR: dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 1998. Pod obshh. red. L. D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. I (1), 432.
2. Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 1999. Pod obshh. red. L.D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. II(1), 737.
3. Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 2007. Pod obshh. red. L.D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. II(6), 897.
4. Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 2007a. Pod obshh. red. L.D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. II (7), 697.
5. Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 2009. Pod obshh. red. L.D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. III(1), 737.
6. Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy [Atomic project of the USSR: documents and materials]. 2009a. Pod obshh. red. L.D. Rjabeva. Sarov: RFJaC-VNIIEF; M.: Nauka, Fizmatlit. III(2), 601.
7. Bitsadze A. V., Kantorovich L. V., Lavrent'ev M. A. 1968. Sergei L'vovich Sobolev (on his sixtieth birthday). Russian Math. Surveys, 23:5 (1968), 131–140. (in Russian).
8. Bogatov E. M. 2021. Atomnyj proekt SSSR — kuznica kadrov Akademii nauk (otdelenie matematiki) [The atomic project of the USSR is the forge of personnel of the Academy of Sciences (Department of Mathematics)]. Sbornik materialov mezhdunarodnoj konferencii KROMSh-2021. Simferopol': POLIPRINT: 110.

9. Bogatov E. M., Korenev A. V., Mihajlov I. S. 2022. O vklade matematikov vtoroj velichiny v Atomnyj proekt SSSR [On the contribution of mathematicians of the second magnitude to the Atomic Project of the USSR]. Materialy 12-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii MOLODEZH" I XXI VEK - 2022. V 4-h tomah. Otv. redaktor M. S. Razumov. Kursk, 1: 366-368.
10. Bogatov E. M., Bogatova V. P. 2022. O vklade matematikov v Atomnyj proekt SSSR. [On the contribution of mathematicians to the Atomic Project of the USSR]
URL http://m.mathnet.ru/php/seminars.shtml?option_lang=rus&presentid=33937 (accessed 08.04.2022)
11. Bogunenko N. N., Pelipenko A. D., Sosnin G. A. 2005. Geroi atomnogo proekta (Heroes of the atomic project). Federal'noe agentstvo po atomnoj jenergii. Sarov: FGUP RFJaC-VNIIEF, 566.
12. Brushlinskij K. V., Ezerova G. N., Zabrodin A. V., Keldysh S. M. 2002. Keldysh M.V. Tvorcheskij portret po vospominanijam sovremennikov [Keldysh M.V. A creative portrait based on the memoirs of contemporaries.]. M.: Nauka, 398.
13. Brushlinskij K. V. 2011. Stroitel' sovetsoj nauki. 100 let so dnja rozhdenija Mstislava Keldysha [Builder of Soviet science. 100 years since the birth of Mstislav Keldysh]. Nash sovremennik. 2: 185-190.
14. Vizgin V. P. 2011. Vzaimodejstvie fizikov i matematikov v sovetskom atomnom proekte (1940–1950-e gg.) [Interaction of physicists and mathematicians in the Soviet atomic project (1940-1950s)]. Istoriko-matematicheskie issledovaniya : 53-76.
15. Vishik M. I., Ljusternik L. A. 1959. Sergej L'vovich Sobolev (k pjatidesjatiletiju so dnja rozhdenija) [Sergei Lvovich Sobolev (on his fiftieth birthday)]. Uspehi matematicheskikh nauk. 14:3(87): 203-210.
16. Vladimirov V. S. 2009. Matematika i sozdanie pervykh obrazcov atomnogo oruzhija. K 60-letiju vzryva pervoj atomnoj bomby [Mathematics and the creation of the first samples of atomic weapons. To the 60th anniversary of the explosion of the first atomic bomb]. Atomnaja strategija. 05(42): 27-40.
17. Vladimirov V. S., Kublanovskaja V. N. 2002. Vychislenija dlja atomnogo proekta. Leonid Vital'evich Kantorovich: chelovek i uchjonyj [Calculations for the atomic project. Leonid Vitalievich Kantorovich: man and scientist]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 153-160.
18. Daugavet O. K., Romanovskij I. V. 2012. O dejatel'nosti i rabotah L.V. Kantorovicha v oblasti programmirovanija [On the activities and works of L. V. Kantorovich in the field of programming]. Zhurnal Novoj jekonomicheskoy asociacii. M., 1(13): 185–190.
19. Demidenko G. V. 2008. K stoletiju so dnja rozhdenija Sergeja L'vovicha Soboleva [On the centenary of the birth of Sergei Lvovich Sobolev]. Vestnik NGU. Serija: Matematika, mehanika, informatika. 8(4): 3-12.
20. Dmitriev A. L., Ivanova E. A. 2002. K 90-letiju so dnja rozhdenija L. V. Kantorovicha [To the 90th anniversary of the birth of L. V. Kantorovich]. Jekonomicheskaja nauka sovremennoj Rossii. 3: 124-127.
21. Erugin N. P., Il'in V.A., Samarskij A. A., Sveshnikov A. G. 1981. Andrej Nikolaevich Tihonov (k 75-letiju so dnja rozhdenija) [Andrey Nikolaevich Tikhonov (on the occasion of the 75th birthday)]. Differenc. uravnenija, 17(10): 1731–1737.
22. Il'in V. A., Sveshnikov A. G. 1966. Andrej Nikolaevich Tihonov (k 60-letiju so dnja rozhdenija) [Andrey Nikolaevich Tikhonov (on the occasion of his 60th birthday)]. Differencial'nye uravnenija. 2(10): 1408–1412.
23. Istorija sovetskogo atomnogo proekta: Dokumenty, vospominanija, issledovanija: vyp. 1 [History of the Soviet atomic project: Documents, memoirs, research]. Otv. red. i sost. V.P. Vizgin. — M.: Janus-K, 1998, 392.
24. Istorija sovetskogo atomnogo proekta. Dokumenty, vospominanija, issledovanija. Vyp. 2. [History of the Soviet atomic project: Documents, memoirs, research]. Red. V. P. Vizgin. SPb.: Izd. RHGI, 2002: 413–488.
25. Kantorovich L. V., Krylov V. I. 1936. Metody priblizhennogo reshenija differencial'nyh uravnenij v chastnyh proizvodnyh [Methods for Approximate Solution of Partial Differential Equations]. M.-L., ONTI, 528.
26. Kantorovich L. V., Krylov V. I. 1949. Priblizhennye metody vysshego analiza [Approximate methods of higher analysis]. L., M.: GITTL: 696.
27. Kantorovich L. V. 1948. Funkcional'nyj analiz i prikladnaja matematika [Functional analysis and applied mathematics]. Uspehi matematicheskikh nauk, 3:6(28): 89–185.
28. Kantorovich L. V. 1956. Priblizhjonnoe reshenie funkcional'nyh uravnenij [Approximate solution of functional equations]. Uspehi matematicheskikh nauk, 11:6(72): 99–116.
29. Kantorovich L. V. 1957. Ob odnoj matematicheskoj simvolike, udobnoj pri provedenii vychislenij na mashinah [About one mathematical symbolism, convenient for carrying out calculations on machines]. Doklady AN SSSR, 113:4, 738–741.
30. Kantorovich V. L., Kutateladze S. S., Fet Ja. I. (Red.). 2002. Leonid Vital'evich Kantorovich – chelovek i uchjonyj [Леонид Витальевич Канторович - человек и учёный]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Instituta matematiki, I:543.
31. Kantorovich Leonid Vital'evich (1912–1986): Biobibliograficheskij ukazatel' [Kantorovich Leonid Vitalievich (1912–1986): Bio-Bibliographic Index]. 2012. Red. Kutateladze S.S. 2-e izd., pererab. i dop. Novosibirsk: Izd-vo In-ta matematiki, 204.
32. Keldysh, M. V. 1985. Izbrannye trudy. Matematika [Selected works. Mathematics]. otv. red. Babenko K. I., Bogoljubov N. N., Chencov N. N. M.: Nauka, 447.
33. Keldysh, M. V. 1985a. Izbrannye trudy. Mehanika [Selected works. Mechanics]. Otv. red. Babenko K.I., Svishhev G.P., Chencov N.N., M.: Nauka, 567.

34. Krajneva I. A. 2019. Akademik Sergej L'vovich Sobolev v sovetskom atomnom proekte [Academician Sergei Lvovich Sobolev in the Soviet atomic project]. Gumanitarnyj vektor. 14(6):72-80.
35. Kutateladze S. S. 2008. Sobolev of the Euler school. Siberian Math. J, 49:5, 771–779 (in Russian).
36. Mstislav Vsevolodovich Keldysh (on the seventy-fifth anniversary of his birth). 1986. Russian Math. Surveys, 41:3, 241–245 (in Russian).
37. Samarskij A. A. 1997. Prjamoy raschet moshhnosti vzryva. Nauka i obshhestvo: istorija sovetskogo atomnogo proekta (40-50 gody) [Direct calculation of the power of the explosion. Science and society: the history of the Soviet atomic project (40s - 50s)]. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ISAP-96. M.: IzdAT, 214-222.
38. Samokish B. A. 2012. L.V. Kantorovich i vychislitel'naja matematika [L.V. Kantorovich and computational mathematics]. Zhurnal Novoj jekonomicheskoy associacii. M., 1 (13): 181-185.
39. Sobolev S. L. 1955. Zamykanie vychislitel'nyh algoritmov i nekotorye ego primeneniya [Closure of computational algorithms and some of its applications]. M.: AN SSSR: 30.
40. Sobolev S. L. 1956. Nekotorye zamechanija o chislennom reshenii integral'nyh uravnenij [Some remarks on the numerical solution of integral equations]. Izvestija AN SSSR. Serija matematicheskaja. 20:4, 413–436.
41. Sobolev S. L. 2003. Izbrannye trudy. Uravnenija matematicheskoy fiziki. Vychislitel'naja matematika i kubaturnye formuly [Selected works. Equations of mathematical physics. Computational mathematics and cubature formulas]. Novosibirsk: Izd-vo In-ta matematiki, Filial «Geo» Izd-va SO RAN, 1: 692 .
42. Sobolev S. L., Kantorovich L. V., Ljusternik L. A. 1956. Funkcional'nyj analiz i vychislitel'naja matematika. Trudy III Vsesojuznogo matematicheskogo s'ezda [Functional analysis and computational mathematics. Proceedings of the III All-Union Mathematical Congress]. M., 2; 43.
43. Sobolev Sergej L'vovich (1908–1989). Biobibliograficheskij ukazatel' [Sobolev Sergey Lvovich (1908-1989). Bio-bibliographic index]. 2008. Red. i avt. vstup. st. S. S. Kutateladze. 3-e izd., pererab. i dop. Novosibirsk: Izd-vo Instituta matematiki. 150.
44. Sofronov I. D. 2005. Matematicheskoe modelirovanie vo VNIIEF [Mathematical modeling at VNIIEF]. Istoriko-matematicheskie issledovanija. Vtoraja serija. 9: 265-281.
45. Tihonova A. A., Tihonov N.A.. 2004. Andrej Nikolaevich TIKHONOV. Serija «Vydajushhiesja uchenye fizicheskogo fakul'teta MGU», VIII. M.: Fizicheskij fakul'tet MGU. 124.
46. Tihonov A. N., Samarskij A.A. 1956. O raznostnyh shemah dlja uravnenij s razryvnymi koeficientami [On difference schemes for equations with discontinuous coefficients]. Doklady AN SSSR. 108(3): 393-396.
47. Tihonov A. N., Samarskij A. A. 1958. Ob odnorodnyh raznostnyh shemah [On homogeneous difference schemes]. Doklady AN SSSR. 122(4): 562–565.
48. Tihonov A. N., Samarskij A. A. 1959. O shodimosti raznostnyh shem v klasse razryvnyh koeficientov [On the convergence of difference schemes in the class of discontinuous coefficients]. Doklady AN SSSR. 124(3):1529-1532.
49. Tihonov A. N., Samarskij A. A. 1963. Ob ustojchivosti raznostnyh shem [On the stability of difference schemes]. Doklady AN SSSR. 149(3): 529-531.
50. Tihonov A. N. 1963. O reshenii nekorrektno postavlenykh zadach i metode reguljarizacii [On the solution of ill-posed problems and the regularization method]. Doklady AN SSSR. 151(3): 501-504.
51. Trutnev Ju. A. 2002. M. V. Keldysh i ego kollektiv v reshenii atomnoj problemy. V kn. Tvorcheskij portret po vospominanijam sovremennikov [M. V. Keldysh and his team in solving the atomic problem. In book “A creative portrait based on the memoirs of contemporaries”]. M.: Nauka: 66-71.
52. Uchenyj s širokim krugozorom, umejushhij mechtat': k 100-letiju so dnja rozhdenija akademika M.V. Keldysha [A scientist with a broad outlook, able to dream: on the occasion of the 100th anniversary of Academician M.V. Keldysh]. Istoricheskij arhiv. 2011. 1: 3-32.
53. Chencov N. N. 1991. Vsemirno izvestnyj, vseмерно zasekrechennyj [World famous, top secret]. Nauka i zhizn'. 2: 102-107.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 21.03.2022

Поступила после рецензирования 02.05.2022

Принята к публикации 05.05.2022

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Богатов Егор Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» в г. Губкине Белгородской области; доцент Старооскольского технологического института им. А. А. Угарова (филиала) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

ул. Комсомольская, 16, Губкин, 309180, Россия
мкр. Макаренко, 42, Старый Оскол, 309516, Россия
E-mail: embogatov@inbox.ru

Богатова Вера Павловна – кандидат физико-математических наук, доцент, пенсионер
E-mail: mverabog@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egor Bogatov – PhD in Mathematics, Associate professor, Associate professor in Branch of National Research University of Science and Technology "MISIS"Gubkin, Russia; Associate professor in Sary Oskol Technological Institute of National Research University of Science and Technology "MISIS Sary Oskol, Russia

Vera Bogatova – PhD in Mathematics, Associate professor, pensioner, Gubkin, Russia