

СЕРГЕЮ КОНСТАНТИНОВИЧУ ГОДУНОВУ ПОСВЯЩАЕТСЯ

© 2024 г. К.В. Брушлинский^{1,*}, Г.В. Демиденко^{2,3,**}, В.Т. Жуков^{1,***}

¹ 125047 Москва, Миусская пл., 4, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

² 630090 Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН

³ 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Новосибирский государственный университет

*e-mail: brush@keldysh.ru

**e-mail: demidenk@math.nsc.ru

***e-mail: zhukov@kiam.ru

Поступила в редакцию 20.05.2024 г.

Сергей Константинович Годунов родился 17 июля 1929 г. в Москве. В 1946 г. после окончания спецшколы ВВС он поступил на мехмат Московского государственного университета, где прошел хорошую школу и получил прочный математический фундамент. Его наставниками были выдающиеся советские ученые и педагоги Б.Н. Делоне и И.Г. Петровский. В 1951 г. после окончания МГУ он был принят в Расчетное бюро Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР. С первых же дней работы в Расчетном бюро, а затем в Отделении прикладной математики МИАН, С.К. Годунов принимает активное участие в работе большого коллектива ученых, созданного для решения важнейших практических задач по математическому моделированию и проведению расчетов различных процессов в области ядерной физики. С этого времени началось его беззаветное служение науке, которое продолжалось более 70 лет.



Фиг. 1. Курсант Московской спецшколы ВВС — советник РАН Института математики им. С.Л. Соболева

Выдающийся ученый академик Сергей Константинович Годунов являлся одним из наиболее ярких лидеров современной прикладной математики и механики. Его фундаментальный вклад в развитие вычислительной математики, численных методов механики сплошных сред, теории дифференциальных уравнений трудно переоценить. Его научные труды в значительной степени определили современный облик численного анализа, заложили новые перспективные направления его развития. С.К. Годунов — автор более 300 научных работ, в том числе 18 монографий, многие из которых переведены на другие языки и стали классическими. Описание полученных им результатов содержится в обзоре [1]. Приведем лишь несколько результатов, которые принесли С.К. Годунову всемирную известность.

Одним из первых наиболее значимых результатов Сергея Константиновича является «разностная схема Годунова». Схема была разработана им для расчетов разрывных решений задач одномерной газовой динамики.

Эта работа была инициирована М.В. Келдышем и И.М. Гельфандом, предложивших осенью 1953 г. молодому учёному Сергею Годунову создать вариант метода Дж. Неймана и Р. Рихтмайера для расчета уравнений газовой динамики с использованием искусственной вязкости. Однако в 1954 г. Сергей Годунов предложил свой метод расчёта, и с течением времени его схема приобрела всемирную известность и была названа его именем. В основу разработки схемы было положено требование сохранения монотонности численных решений при переходе с каждого расчетного временного слоя на следующий, реализованное с помощью точного решения задачи Римана о распаде разрыва. При работе над этой задачей проявились яркий талант С.К. Годунова, нестандартность его мышления, колоссальная работоспособность и стремление докопаться до истины. Его результаты были опубликованы в 1959 г. в статье [2]. Многолетний опыт применения схемы Годунова обобщен в монографии [3], вышедшей в 1976 г. Но особенно большой интерес к схеме Годунова проявился в 80-е годы прошлого века, когда возникла необходимость разработки методов высокой точности для гиперболических систем. На основе метода, предложенного С.К. Годуновым, было разработано множество различных модификаций, которые используются в разнообразных приложениях от медицины до астрофизики.

Схема Годунова оказала существенное влияние на последующее развитие численных методов. В настоящее время имеется большое число приближенных методов для расчета разрывных решений нелинейных уравнений, в частности, многие разностные схемы основаны на идеях С.К. Годунова. В связи с этим большой интерес представляют комментарии и пояснения самого Сергея Константиновича по схеме Годунова [4]. Огромное влияние на развитие современной вычислительной математики оказала также монография [5], написанная С.К. Годуновым в соавторстве с В.С. Рябеньким. Эта монография была первым отечественным изложением вычислительной математики 50–60 гг. Она стала учебником и настольной книгой для многих специалистов. В ней излагались важные теоретические вопросы и конкретные разностные методы на модельных примерах. Впоследствии эта монография неоднократно переиздавалась с дополнениями.

В своей работе Сергей Константинович всегда руководствовался принципом «идти от приложений». За время работы в Отделении прикладной математики (с 1966 г. — Институт прикладной математики АН СССР, а с 1978 года — ИПМ им. М.В. Келдыша) им было создано множество методов для приближенного решения различных конкретных задач, заложены основы новых направлений прикладной математики и механики. В частности, им был создан метод установления для анализа обтекания тел потоком газа. В дальнейшем этот метод стал универсальным приемом для приближенного построения стационарных решений с помощью нестационарной задачи. Под руководством С.К. Годунова была начата разработка первых алгоритмов для построения криволинейных разностных сеток. Эти алгоритмы используются для расчета разрывных решений двумерных задач механики сплошной среды. В настоящее время разработкой алгоритмов для построения разностных сеток в многомерных областях занимаются в различных научных организациях в нашей стране и за рубежом. С.К. Годуновым разработан метод ортогональной прогонки для решения краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Этот метод применяется при решении большого числа прикладных задач, в частности, он использовался при расчетах атомных реакторов.

Решая различные прикладные задачи механики сплошных сред, С.К. Годунов получил важные теоретические результаты для квазилинейных дифференциальных уравнений математической физики. В частности, он проводил исследования проблемы единственности решений, проблемы построения обобщенных решений. В своих работах (см., например, [6, 7]) он впервые поставил вопросы о глубокой связи законов термодинамики и корректности систем дифференциальных уравнений для моделей механики сплошных сред, об обобщении понятия энтропии и закона ее возрастания, о термодинамических соотношениях. Полученные в этой области результаты составили содержание его докторской диссертации (1965 г.). Эти работы С.К. Годунова послужили началом нового направления теоретических и прикладных исследований, посвященных гиперболическим системам законов сохранения в математической физике. Эти исследования активно проводятся в нашей стране и за рубежом.

После переезда С.К. Годунова в Новосибирск, куда его пригласил М.А. Лаврентьев, он был назначен заведующим лабораторией в Вычислительном центре СО АН СССР и продолжил исследования связей фундаментальных вопросов математической физики и теории дифференциальных уравнений. Эти исследования были связаны с работами, проводимыми в лаборатории А.А. Дерибаса в Институте гидродинамики СО АН СССР по сварке металлов взрывом. Проводимые при этом численные расчеты не давали полного объяснения процессов, происходящих в металлах, в частности, образования волн на границе между свариваемыми пластинами. Это приводило С.К. Годунова к мысли о необходимости уточнения классических моделей, используемых для описания высокоэнергетических и высокоскоростных воздействий на металлы. Дело в том, что при больших высокоскоростных воздействиях металлы претерпевают упругие и пластические деформации, при этом могут вести себя, как жидкости. А классические модели это не учитывают! Изучая результаты многочисленных экспериментов, Сергею Константиновичу совместно с учениками и коллегами из Института гидродинамики удалось получить уравнения, которые адекватно описывали как упругую деформацию среды, так и ее течение

при интенсивных воздействиях (нелинейная релаксационная модель Максвелла). При этом полученная модель позволяла проводить расчеты реальных ударно-волновых процессов в металлах. Однако система дифференциальных уравнений нелинейной модели Максвелла не входила в класс квазилинейных систем, введенных С.К. Годуновым в работе [7], гиперболичность которых обеспечивалась выполнением законов термодинамики. Это стало отправной точкой для многолетних исследований, которые привели к появлению класса симметрических гиперболических термодинамически согласованных систем законов сохранения [8, 9]. В настоящее время теория таких систем широко используется как для создания новых моделей сложных сплошных сред, так и для разработки новых численных методов [10].

Наряду с изучением гиперболических систем квазилинейных уравнений, возникающих в задачах сплошных сред, С.К. Годунов вместе со своими учениками проводил исследования линейных гиперболических уравнений и систем. В середине 70-х годов в Новосибирском государственном университете начал работать семинар по гиперболическим уравнениям под руководством С.К. Годунова. На нем, в частности, был поставлен вопрос: всегда ли уравнение высокого порядка, гиперболическое по Петровскому, может быть сведено к симметрической системе первого порядка, гиперболической по Фридрихсу? В одномерном случае, а также для уравнений второго порядка, такое сведение было известно. Однако сведение гиперболического уравнения с двумя пространственными переменными к симметрической гиперболической системе оказалось очень сложной задачей. Ее решение было получено С.К. Годуновым и В.И. Костиным в 1979 г. Затем В.И. Костиным и Т.Ю. Михайловой было установлено аналогичное сведение гиперболических уравнений, инвариантных относительно вращений. Но ответ на вопрос для произвольного гиперболического уравнения оказался отрицательным. В 1983 г. В.В. Иванов построил неожиданный пример гиперболического уравнения четвертого порядка с четырьмя пространственными переменными, которое не сводилось к симметрической системе. Однако вопрос о сведении произвольных гиперболических уравнений с тремя пространственными переменными к гиперболическим системам по Фридрихсу до сих пор остается открытым.

На семинаре по гиперболическим уравнениям рассматривались также вопросы о корректных постановках краевых задач. С.К. Годуновым была поставлена задача изучения корректности общих смешанных задач для гиперболических уравнений на основе «метода симметризации», т.е. метода, позволяющего сводить краевую задачу для гиперболического уравнения к краевым задачам для систем, гиперболических по Фридрихсу, с диссипативными граничными условиями. В этом направлении был получен ряд новых результатов, в частности, для краевых задач для векторного волнового уравнения были установлены существенно более сильные результаты по сравнению с результатами, полученными японскими математиками.

Осознавая исключительную важность применения аппарата линейной алгебры к задачам уравнений математической физики и механики сплошных сред, Сергей Константинович уделял большое внимание правильным постановкам задач вычислительной линейной алгебры. Он внёс огромный вклад в создание надежных алгоритмов их решения на компьютере. Интерес к этим вопросам у С.К. Годунова возник еще в 50-е годы при решении конкретных прикладных задач, связанных с ядерной физикой. Он был одним из первых математиков, кто стал давать правильные объяснения вычислительным парадоксам, подчеркивая, что при выполнении компьютерных расчетов, необходимо учитывать не только погрешности входных данных, но и ошибки округления, неизбежно возникающие в процессе вычислений.

В своей научной деятельности С.К. Годунов всегда мыслил независимо от устоявшихся парадигм. Широкий математический кругозор, научная смелость и необыкновенная интуиция позволяли ему «чувствовать задачу», отделять главное от второстепенных деталей. Отчетливо осознавая, что классический аппарат линейной алгебры не был ориентирован на компьютерные вычисления, Сергей Константинович ввёл фундаментальное понятие «гарантированная точность» вычислений на компьютере, им были определены новые понятия: ε -спектр, спектральный портрет, расслоение спектра, критерий качества дихотомии и др. [11–13]. Большая часть исследований по вычислительной линейной алгебре была выполнена в Институте математики Сибирского отделения, куда в 1980 г. по приглашению С.Л. Соболева перешел С.К. Годунов вместе со своей лабораторией. Именно в Институте математики в рамках новой концепции гарантированной точности С.К. Годуновым и его учениками был детально изучен ряд спектральных задач для конечномерных операторов, разработаны новые алгоритмы решения систем линейных алгебраических уравнений, решения задач устойчивости и дихотомии для обыкновенных дифференциальных уравнений, детально исследован метод ортогональной прогонки, получивший широчайшее распространение. Эти исследования также нашли многочисленных последователей и используются при создании методов и алгоритмов для суперкомпьютерных вычислений.

Выдающийся ученый С.К. Годунов являлся прекрасным педагогом. Он преподавал в Московском и Новосибирском государственных университетах. В 1977–1990 гг. являлся заведующим кафедрой дифференциальных уравнений в НГУ, основателем которой был академик С.Л. Соболев. Им были прочитаны оригинальные лекционные курсы “Уравнения математической физики”, “Механика сплошной среды”, “Дифференциальные уравнения”, “Современные аспекты линейной алгебры”. Широко известны его научно-образовательные семинары

“Гиперболические уравнения” (НГУ) и “Математика в приложениях” (ИМ СО РАН), которыми он руководил на протяжении многих лет. За время работы в Новосибирском государственном университете, в Вычислительном центре СО АН СССР, а затем в Институте математики, носящем сейчас имя С.Л. Соболева, Сергей Константинович воспитал немало учеников, которые и сейчас продолжают активно работать в науке.

Научные результаты С.К. Годунова получили высокую оценку со стороны государства и мирового научного сообщества. За выполнение специальных заданий Правительства и решение важных задач новой оборонной техники он был удостоен звания Лауреата Ленинской премии (1959 г.). С.К. Годунов награжден многими орденами: «Знак Почёта» (1954, 1981), «Трудового Красного Знамени» (1956, 1975), Почёта (2010), Александра Невского (2023). За цикл работ по исследованию процессов, сопутствующих сварке металлов взрывом, С.К. Годунову с соавторами присуждена премия им. А.Н. Крылова АН СССР (1972 г.), за книгу “Элементы механики сплошной среды” — премия им. М.А. Лаврентьева РАН (1993 г.). В 2022 г. «за выдающиеся результаты в области вычислительной математики» С.К. Годунов был награжден Золотой медалью им. Л. Эйлера РАН. Свидетельством мирового признания научных заслуг С.К. Годунова являются проходящие за рубежом международные конференции, посвященные его методам. В 1997 г. ему была присуждена степень почетного доктора Мичиганского университета США. В 2020 г. С.К. Годунову была присуждена премия им. Рамеша Агарвала в области вычислительной гидродинамики (SAE/Ramesh Agarwal Computational Fluid Dynamics Award).

* * *

Сергей Константинович Годунов был беззаветно предан науке. Он всегда был полон сил и творческих замыслов. Его идейная убежденность, высокая культура, широкая эрудиция всегда притягивала к нему коллег, учеников и последователей. Он был из тех людей, общение с которыми духовно обогащает. Светлая память о Сергее Константиновиче навсегда сохранится в сердцах его друзей, учеников, коллег и всех, кто его знал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белых В.Н., Брушлинский К.В., Васкевич В.Л., Киселёв С.П., Крайко А.Н., Куликовский А.Г., Мали В.И., Пухначёв В.В., Роменский Е.И., Рябенский В.С.* Сергею Константиновичу Годунову 85 лет // Успехи мат. наук, т. 70, вып. 3, 2015.
2. *Годунов С.К.* Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Математический сборник, т. 47, № 3, 1959.
3. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
4. *Годунов С.К.* Воспоминания о разностных схемах. Новосибирск: Научная книга, 1997.
5. *Годунов С.К., Рябенский В.С.* Введение в теорию разностных схем. М.: Физматгиз, 1962.
6. *Годунов С.К.* Термодинамика газов и дифференциальные уравнения // Успехи мат. наук, т. 14, вып. 5, 1959.
7. *Годунов С.К.* Интересный класс квазилинейных систем // Докл. АН СССР, т. 139, № 3, 1961.
8. *Годунов С.К.* Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978.
9. *Годунов С.К., Роменский Е.И.* Элементы механики сплошных сред и законы сохранения. Новосибирск: Научная книга, 1998.
10. *Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И.* Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014.
11. *Годунов С.К., Антонов А.Г., Кирилюк О.П., Костин В.И.* Гарантированная точность решения систем линейных уравнений в евклидовых пространствах. Новосибирск: Наука, Сиб. Отд-ние, 1988.
12. *Годунов С.К.* Современные аспекты линейной алгебры. Новосибирск: Научная книга, 1997.
13. *Годунов С.К.* Лекции по современным аспектам линейной алгебры. Новосибирск: Научная книга, 2002.

DEDICATED TO SERGEI KONSTANTINOVICH GODUNOV

K.V. Brushlinsky^{a,*}, G.V. Demidenko^{b,c,**}, V.T. Zhukov^{a,***}^a*Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047 Russia*^b*Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Acad. Koptug Ave., 4, Novosibirsk, 630090 Russia,*^c*Novosibirsk State University, Pirogov St., 1, Novosibirsk, 630090 Russia*^{*}*e-mail: brush@keldysh.ru*^{**}*e-mail: demidenk@math.nsc.ru*^{***}*e-mail: zhukov@kiam.ru*

Received 20 May, 2024

Abstract. Sergei Konstantinovich Godunov was born on July 17, 1929, in Moscow. In 1946, after completing an Air Force special school, he enrolled in the Mechanics and Mathematics Faculty at Moscow State University, where he received a solid mathematical foundation and excellent training. His mentors included prominent Soviet scientists and educators B.N. Delone and I.G. Petrovsky. In 1951, after graduating from Moscow State University, he joined the Computational Bureau of the Steklov Mathematical Institute of the USSR Academy of Sciences. From his very first days working in the Computational Bureau, and later in the Department of Applied Mathematics at MIAS, S.K. Godunov became an active member of a large group of scientists dedicated to addressing critical practical tasks in mathematical modeling and calculations across various nuclear physics processes. This marked the beginning of his unwavering dedication to science, which continued for more than 70 years.