

## ПРЯМОЙ РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА

*А.А. Самарский*

В докладе излагается история разработки численных методов и их применение для расчета полных моделей атомного и термоядерного взрывов, а также история развития коллектива, созданного для указанных целей А.Н. Тихоновым в 1948 году, впервые в мире проведшего такие расчеты.

Есть одна сторона обсуждаемой проблемы, о которой до сих пор мало говорят и говорили, — математическое обеспечение ядерной программы.

Взрыв ядерной бомбы — это одновременное протекание многих взаимосвязанных процессов: деления ядерного горючего нейтронами, распространения образующихся при этом нейтронов, выделения энергии и ее переноса по веществу, газодинамического разлета чудовищно разогревшегося вещества. Все эти процессы описываются системой нелинейных уравнений в частных производных. Такие задачи ни физики, ни математики в 1947—48 гг. не умели решать.

В 1947 году заканчивались конструкторские работы по созданию советской атомной бомбы. Возник вопрос о теоретическом прогнозе мощности взрыва. Эта проблема в начале 1948 года обсуждалась на семинаре И.В. Курчатова. К этому времени уже были предложены упрощенные модели атомной бомбы, описываемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений для средних величин.

Присутствовавший на семинаре А.Н. Тихонов предложил провести методом конечных разностей прямой численный расчет взрыва на основе полных моделей физических процессов (распространения нейтронов и тепла, ядерного горения и газодинамики), описываемых системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, используя их представление в лагранжевых координатах.

В то время ни теории, ни опыта практического применения разностных схем для сложных задач математической физики фактически не было. По-

этому это заявление было неожиданным для физиков и вызвало реплику Л.Д. Ландау, что такой расчет явился бы научным подвигом.

Для проведения вычислительных работ с целью изучения процесса ядерного взрыва по инициативе И.В. Курчатова было издано Постановление Совета Министров СССР о создании специальной лаборатории под руководством А.Н. Тихонова при Геофизическом институте Академии наук. В это время А.Н. Тихонов был заведующим кафедрой высшей математики на физическом факультете МГУ и заведующим математическим отделом Геофизического института АН СССР.

Непростой проблемой был подбор кадров для лаборатории. Работа, которую предстояло выполнить, требовала объединения усилий физиков, математиков-специалистов по дифференциальным уравнениям и вычислителей. Квалифицированных специалистов по численным методам тогда фактически не было. Поэтому такие кадры предполагалось готовить в процессе решения реальных задач.

До появления компьютеров оставалось около шести лет. Для расчетов можно было использовать только арифмометры “Феликс” и несколько позже клавишные машины “Мерседес”.

Весной 1948 года я окончил аспирантуру на физическом факультете МГУ и защитил кандидатскую диссертацию. Вместе с А.Н. Тихоновым мы в 1945—1948 гг. выполнили ряд расчетно-теоретических работ по теории противогаса (задачи динамики сорбции и десорбции смесей газов) и теории возбуждения радио-волноводов. Это дало мне некоторый опыт вычислительных работ. В этом же году закончил физический факультет МГУ В.Я. Гольдин, который под руководством А.Н. Тихонова занимался изучением уравнения переноса нейтронов.

Кроме того, в лабораторию были зачислены аспирант мехмата МГУ геометр Н.Н. Яненко, и через два года еще один ученик Андрея Николаевича, выпускник физфака МГУ Б.Л. Рождественский (с 1951 г.) В самый начальный период некоторое участие на стадии обсуждения аналитических методов решения переноса нейтронов принимал профессор Е.С. Кузнецов.

Для проведения расчетов была создана группа вычислителей. В основном это были выпускницы Геодезического института, а также МГУ.

Важную роль в обучении вычислителей сыграла кандидат физ.-мат. наук О.П. Кремер, имевшая опыт численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений в группе академика Фесенкова при обработке материалов астрофизических наблюдений. В дальнейшем О.П. Кремер отличилась как один из первых в нашей стране программистов, работавших на первых компьютерах.

Наша лаборатория была организована при Геофизической Комплексной Экспедиции Геофизического института АН СССР и располагалась снача-

ла на Пятницкой ул., затем на Кировской ул. и, наконец, с 1952 г. на Миусской площади в помещении, ранее занимавшемся ФИАНОм.

Разработка численных методов для полной системы уравнений с частными производными, описывающей ядерный взрыв, была поручена мне; В.Я. Гольдину и О.П. Кремер — проведение расчетов по заданиям Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшица и И.М. Халатникова, которые построили модель атомного взрыва в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для средних по пространству характерных величин.

В.Я. Гольдину была поручена также проверка системы ОДУ. Для этого он построил полную систему уравнений взрыва в частных производных и интегро-дифференциального уравнения переноса нейтронов и из нее вывел систему ОДУ, используя приближения, указанные И.М. Халатниковым.

Теоретические и физические аспекты расчетов, в том числе постановка задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений и анализ особых точек, проводились В.Я. Гольдиным совместно с Н.Н. Яненко. Все эти расчеты были в высшей степени срочными и их результаты использовались немедленно. А.А. Самарский занимался разработкой и проведением прямого расчета ядерного взрыва.

Расчет ядерного взрыва требовал совместного решения кинетического уравнения переноса нейтронов, уравнений газодинамики с теплопроводностью. Для нестационарного уравнения переноса в сферической системе координат мною в 1948 году была предложена и испытана монотонная разностная схема, а в начале 1949 года был осуществлен первый расчет полной системы уравнений взрыва сначала плутониевого шара, а затем изделия с оболочкой из урана. Кроме того, было проведено усреднение уравнений в частных производных по пространству и углам с использованием профилей из полного расчета этих уравнений, что привело к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Таким образом, меньше чем за год группа из 3-х научных работников и вычислителей, считавших на “Арифмометрах”, сумела, начав работу “с нуля”, построить методы, наладить расчеты и получить первые производственные результаты.

В 1949—1950 годах были произведены более сложные расчеты. При этом использовались дифференциально-разностные аппроксимации (разностные по пространству и дифференциальные по времени), которые решались итерационно-разностными методами.

Для ускорения вычислений был разработан метод распараллеливания вычислений с участием 30—40 вычислителей. Этот метод позволил выполнять расчеты на электрических арифмометрах “Мерседес” в короткие сроки, что было чрезвычайно важно в то время.

Обработка расчетов, полученных в 1949—1950 годах, позволила мне сформулировать в 1950 году общий принцип консервативности, т.е. выполнение

---

---

законов сохранения на дискретном уровне для разностных схем. Опыт двух лет вычислительной работы показал, что необходимо уделить внимание развитию теоретических работ. Идея консервативности однородных разностных схем в дальнейшем была детально изучена в работах А.Н. Тихонова и А.А. Самарского, которые нашли необходимые условия консервативности разностных схем для изучаемых классов дифференциальных уравнений.

В 1950 году к нам обратился И.Е. Тамм с предложением рассчитать более сложную конструкцию. Вначале мы не были посвящены в физическую и техническую идеи этой конструкции. Затем с нами установили контакт А.Д. Сахаров и Ю.А. Романов. Речь шла о создании водородной бомбы. Потребовалось усложнение и дальнейшее развитие методов. В 1951 году были проведены первые расчеты. Важную роль сыграл проведенный А.А. Самарским переход к консервативным разностным схемам. Для уравнений нелинейной теплопроводности и диффузии нейтронов использовались неявные схемы с применением итерационных методов для определения решений на новом слое, а для газодинамики использовались явные схемы.

Эта работа потребовала концентрации наших сил для получения разностных уравнений, подготовки детальных заданий, организации расчетов, уточнения физических характеристик. В этой работе совместно участвовали А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, В.Я. Гольдин, Н.Н. Яненко и Б.Л. Рождественский. Для проведения расчетов создавались бригады вычислителей. Можно вспомнить ряд выдающихся вычислителей, которые чувствовали решение, не зная его смысла (А.А. Трофимова, В.Н. Равинская, М.И. Волчинская, В.А. Лохина, В.К. Камерон и многие другие). Руководили расчетами А.А. Самарский, В.Я. Гольдин, Б.Л. Рождественский.

Для уточнения физических аспектов проблемы важную роль сыграл семинар И.Е. Тамма. Именно на нем В.Я. Гольдин узнал о работе Фейнмана, Теллера, Метрополиса, что привело его к постановке и проведению расчетов уравнения состояния и созданию интерполяционных формул. В результате уравнения состояния идеального газа были заменены на более точную модель. Н.Н. Яненко, анализируя эти уравнения, построил асимптотику, что помогло уточнить интерполяционные формулы. Важнейшую роль играла оценка эффекта перемешивания (неустойчивость Релея—Тейлора), модель для которой была предложена С.З. Беленьким, сотрудником И.Е. Тамма.

И.Е. Тамм стимулировал проведение исследований процесса сжатия на границе активных и пассивных областей. Мною были найдены соответствующие автомодельные решения и использованы в качестве тестов при расчете контактных разрывов.

В результате нами в 1950—51 годах были разработаны численные методы, в 1951 г. произведен первый расчет “слойки” А.Д. Сахарова и выпущен отчет. После этого в 1951—53 годах были произведены расчеты ряда вари-

антов “слойки”. Эти расчеты помогли физикам увидеть наглядно все процессы при взрыве и выбрать окончательную конструкцию. Результаты успешных испытаний 1953 года подтвердили идеи физиков, заложенные в конструкцию, и показали, что наши модели и расчеты, проведенные до появления ЭВМ, с хорошей точностью соответствуют физике.

Эта работа получила высокую оценку. А.Н. Тихонову было присвоено звание Героя Социалистического Труда, присуждена Государственная премия 1-й степени. Государственные премии и ордена были также присуждены А.А. Самарскому, В.Я. Гольдину, Н.Н. Яненко и Б.Л. Рождественскому. Группа наших сотрудников была награждена орденами и медалями.

В 1953 году для математического обеспечения атомной и космической программ был создан специальный институт — Отделение прикладной математики — ОПМ (в дальнейшем переименованный в Институт прикладной математики) в результате объединения групп М.В. Келдыша из МИАНа и лаборатории А.Н. Тихонова из ГЕОФИАНа. М.В. Келдыш был назначен директором института, а А.Н. Тихонов заместителем директора. Лаборатория А.Н. Тихонова была преобразована в 3-й отдел института. Заведовать отделом было поручено мне. В 1949—1953 гг. в наш отдел пришло значительное пополнение. Среди них из МГУ И.М. Соболев, С.П. Курдюмов, В.Б. Уваров. Особенно большое пополнение пришло в 1953 году из ряда университетов страны (Горьковский, Саратовский, Томский и др.) Среди них П.П. Волосевич, Н.Н. Анучина, Н.Н. Кучумова, Д.А. Сидорова, Г.В. Данилова и др.

В 1954 г. в ОПМ начала работать первая серийная ЭВМ “Стрела” под руководством А.Н. Мямлина. Переход на ЭВМ заставил нас модернизировать методику, сделать ее однородной, без явного выделения границ и особенностей.

Перевод расчетов на ЭВМ “Стрела” существенно ускорил получение результатов. Это было особенно важно в связи с разработкой нового изделия. В этой работе у нас было тесное сотрудничество с А.Д. Сахаровым, Ю.А. Романовым, Я.Б. Зельдовичем, К.И. Щелкиным, Ю.Н. Бабаевым, Г.А. Гончаровым, Ю.А. Трутневым, В.М. Заграфовым, Л.П. Феокистовым, Е.И. Забахиным, Е.Н. Аврориным и другими теоретиками.

Переход к расчету “слоек” потребовал развития численных методов решения систем дифференциальных уравнений в гетерогенных средах с коэффициентами, меняющимися в сотни раз при переходе из одной области в другую.

В силу нелинейности процессов и неоднородности среды необходимо было строить такие разностные аппроксимации, которые позволяли бы учитывать и передавать с достаточной точностью разрывы (контактные, слабые и сильные ударные волны) решений. Особые трудности пришлось преодолеть при расчете температурных волн, во многом определяющих ход процесса.

---

---

Кроме того, различные процессы кинетики при горении легкого слоя в “слолке”, газодинамики, теплопроводности и диффузии нейтронов имели разные временные масштабы.

Идеи консервативности и однородности разностных схем (А.Н. Тихонов, А.А. Самарский) позволили получить схемы сквозного счета без явного выделения разрывов, обеспечивающие не только конечный результат энерговыделения с достаточной точностью, но и правильное описание динамики процесса горения.

В ходе дискуссии, имевшей место в те годы, мной был построен пример, показывающий, что отказ от выполнения законов сохранения в разностных схемах может привести к полной потере точности в случае гетерогенной среды с разрывными коэффициентами (из-за появления аппроксимационных фиктивных источников неконтролируемой мощности). Тем самым была обоснована необходимость выполнения законов сохранения и для разностных аппроксимаций.

Отказ от выделения разрывов при использовании однородных разностных схем и соблюдение законов сохранения на дискретном уровне обеспечили достаточную точность расчетов изделий.

Своевременно была понята необходимость развития теоретических исследований на уровне, достаточном для класса решаемых задач. Потребности практики стимулировали развитие теоретических работ, прежде всего в нашем коллективе.

В результате были построены основы современной теории разностных схем для широких классов стационарных и нестационарных уравнений математической физики. Укажу такие разделы этой теории как теория устойчивости разностных схем, включающая и теорию итерационных методов решения сеточных уравнений, общая теория регуляризации разностных схем с целью получения схем заданного качества и ее применения к решению обратных (или некорректных) задач, новые принципы аппроксимации многомерных задач (такие как метод суммарной или слабой аппроксимации).

Основные теоретические результаты наших работ нашли отражение в многочисленных публикациях и выпуске ряда книг, многие из которых переведены на иностранные языки. Важно отметить, что методические основы книги А.Н. Тихонова и А.А. Самарского “Уравнения математической физики” (1951) были использованы и развиты в дальнейшем в книгах (свыше 20 книг) по численным методам А.А. Самарского, его учеников и сотрудников.

Наряду с развитием общей методики большое внимание уделялось уточнению модели среды. Уточнялась модель и проводились расчеты коэффициента поглощения. Вначале эти расчеты проводились Н.Н. Яненко по заданиям Е.С. Фрадкина, а затем В.Б. Уваровым и А.Ф. Никифоровым в тесном контакте с Ю.Н. Бабаевым были разработаны новые методики с

---

---

аккуратным учетом квантовой теории. Уточнялась и развивалась методика нейтронных расчетов, о чем будет рассказано в докладе В.Я. Гольдина.

В ОПМ были собраны и разрабатывались все математические аспекты расчетов термоядерных изделий. Важную роль в развитии методик решения задач играли регулярные обсуждения на семинарах М.В. Келдыша.

Проводимая работа необычайно стимулировала теоретические осмысления, которые были положены нами в основу разработки эффективных численных методов решения сложнейших нелинейных задач.

В срочных расчетах для нового изделия важную роль сыграло программирование на ЭВМ "Стрела". Здесь следует отметить большой вклад сотрудников из отдела программирования И.Б. Задыхайло, Э.З. Любимского и др. и сотрудников нашего отдела, упомянутых выше. В результате этих работ был подробно рассчитан процесс взрыва нового изделия и определены все основные характеристики. Результаты испытаний, проведенных осенью 1955 г., оказались в хорошем соответствии с нашими расчетами.

В 1956 г. был создан новый ядерный центр ВНИИП (теперь ВНИИТФ). Для создания математического сектора в новом институте был рекомендован наш сотрудник Н.Н. Яненко. Он набрал большую группу выпускников нескольких университетов. Эти новые сотрудники прошли почти годичную стажировку в ИПМ, в том числе в нашем отделе. В результате возник коллектив, который овладел методиками и программами, созданными в отделах ИПМ. Это позволило в короткий срок создать эффективно работающий математический центр. Он сыграл важную роль в успехах ВНИИП. Такой "матричный" метод создания научных коллективов в новых направлениях чрезвычайно эффективен.

Одновременно все наши методики, задания и программы были переданы и во ВНИИЭФ. Таким образом, в течение ряда лет основные расчеты взрывов во ВНИИЭФ и ВНИИП проводились по нашим методикам и программам, а в дальнейшем по их модификациям.

Ряд сотрудников математического сектора ВНИИЭФ также прошел нашу школу. С другой стороны, для нас было очень полезно сотрудничество с физиками ВНИИЭФ и ВНИИТФ.

Основная часть сотрудников нашего отдела получила физическое образование (физический факультет МГУ, МФТИ, МИФИ), что благотворно сказалось на наших работах. Знание физики позволило самостоятельно формулировать и решать многие задачи и существенно сказалось на подходе к численным методам, что и привело в конечном счете к созданию концепции и методов математического моделирования.

Когда в 1954 году вступил в строй первый отечественный компьютер, начался перевод расчетов на него. В 1954 г. были отлажены производственные программы. Несмотря на весьма скромные параметры компьютера (память 1024 числа и скорость 2000 операций в секунду), сетки можно было брать уже заметно подробнее, чем в ручных расчетах.

Наши разностные методы оказались настолько хорошими, что математическая погрешность расчета стала меньше той неопределенности, которую имели тогдашние данные по уровням состояния, пробегам фотонов и нейтронным константам.

Поэтому пришлось заняться уточнением свойств вещества. Расчеты пробегов фотонов на основе квантовой теории излучения с учетом всех существенных процессов, включая поглощение в линиях, были поручены В.Б. Уварову и А.Ф. Никифорову (1956 г.) Первоначальную физическую постановку задачи дали Ю.Н. Бабаев и Е.С. Фрадкин. Но довольно скоро она начала существенно уточняться (А.Ф. Никифоров, В.В. Уваров, В.В. Новиков, Н.Ю. Орлов). Постепенно эта работа выросла в самостоятельное научное направление, которое с некоторым сдвигом по времени начало развиваться во ВНИИЭФ и ВНИИТФ. Несмотря на это в течение многих лет работы нашей группы не прекращалась. Недавно Н.Ю. Орлов добился высокой точности не только для росселандовых средних, но и для спектральных кривых.

Расчет уравнения состояния был поручен выпускнику физфака МГУ Н.Н. Калиткину (1958 г.) Он начался с уточнения данных Фейнмана, Метрополиса и Теллера на основе поправок Д.А. Киржница к модели Томаса—Ферми. Эта работа также выросла в отдельное научное направление, соединяющее теорию газов и плазмы с конденсированным состоянием вещества. При этом удалось установить связь между оптическими и термодинамическими свойствами горячих веществ, поскольку те и другие оказались обусловленными флуктуирующим микроскопическим электрическим полем в плазме. Эти идеи позволили уточнить расчеты пробегов фотонов.

Необходимость рассчитывать генераторы сверхсильных магнитных полей и токов заставила Н.Н. Калиткина построить теорию проводимости сильно неидеальной плазмы (1966 г.) Эта теория на несколько лет опередила эксперименты и хорошо предсказала их результаты.

Все эти работы были доведены до сложных комплексов программ, по которым были рассчитаны подробные таблицы различных свойств веществ: пробегов фотонов, уравнений состояния, транспортных коэффициентов. Первые таблицы уже в конце 50-х годов были включены в состав программ расчета мощности взрыва на основе уравнений газодинамики с теплопроводностью и переноса нейтронов с ядерными и термоядерными реакциями. В последующие годы эти данные уточнялись на основе учета все большего количества физических эффектов, что привело к существенному увеличению достоверности результатов.

В течение многих лет велась напряженная работа и над математическими, и над рядом физических аспектов расчета взрыва. Результаты жестко проверялись в экспериментах, и ответственность за качество была высокой. Это привело нас к формированию основ современного математиче-

---

---

ского моделирования и вычислительного эксперимента, которые стали основой нашей работы во все последующие годы.

Теоретические и алгоритмические разработки получили в дальнейшем применение для решения многих других задач науки и техники. Достаточно назвать многолетние работы (совместно с коллективом Н.Г. Басова) по лазерному термоядерному синтезу, которые позволили на первом этапе (в начале 70-х годов) опередить работы коллег из США.

Работы, связанные с созданием атомного и водородного оружия, привели к колоссальному ускорению развития не только многих разделов техники, физики, химии, но и перестройке математических наук в связи с появлением компьютеров и вычислительных методов. Ведущую роль в познании теперь играет математическое моделирование с технологией вычислительного эксперимента. Его ядром является триада “модель-алгоритм-программа”.