

ТОЧЕЧНЫЙ ВЗРЫВ В АТМОСФЕРЕ

© *Р.К. Казакова*

kazakova@keldysh.ru

Задача о точечном взрыве в атмосфере была решена впервые на быстродействующей вычислительной машине (БЭСМ-1) в 1953г. Прежде чем приступить к изложению доклада, целесообразно вспомнить историю создания атомного оружия. Первая атомная бомба в СССР (рис.1) была испытана 29 августа 1949г.



Рис.1. Атомный взрыв.

Затем шла эпопея создания водородной бомбы. Краткая история создания в СССР ядерной бомбы по воспоминаниям крупнейшего атомщика, Героя Социалистического Труда Льва Петровича Феокистова такова [1]. Л.П.Феокистов: “В августе 1953г. на башне в Семипалатинском полигоне была успешно испытана первая советская водородная бомба. Подтвердились расчеты, полный триумф. А.Д. Сахаров за несколько месяцев становится доктором физ.-мат. наук, академиком, лауреатом Сталинской премии,

Героем Социалистического Труда, провозглашается, несмотря на молодость лет, "отцом" водородной бомбы. В США же считали, что эта бомба не была "настоящей" водородной бомбой, так как мощность заряда примерно (только!) в 20 раз превосходила мощность атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму и имевшей такие же габариты и вес. Мы же не сомневались, что будем идти и дальше по этому пути, развивая первый успех. Но события стали развиваться по другому пути. На одном из совещаний крупного руководства речь шла о том, чтобы прекратить всю предыдущую деятельность и переключиться на поиск новых решений. О старом забыть. В решении принимали участие крупнейшие деятели: В.А. Малышев, А.П. Завенягин (зам. министра Средмаша), И.Е. Тамм и другие. Помимо всего, ядерный центр переводится из Арзамаса-16 в Челябинск-70. Через несколько месяцев "революционной" (несмотря на переезды) работы внезапно появились, как свет в темном царстве, новые идеи и стало ясно, что настал "момент истины". Тогда же было принято решение о создании нового научно-ядерного центра – на Урале. По сути дела над созданием водородной бомбы работали только в 1954г. и начале 1955-го. А в ноябре 1955г. было произведено испытание водородной бомбы. Результаты оказались ошеломляющими. Все прочие варианты были отставлены. Появились первые в стране лауреаты Ленинской премии во главе с И.В. Курчатовым, многим руководителям было присвоено звание Героя (кому в первый раз, кому во второй и даже в третий), чинам поменьше раздали ордена разного достоинства (М.В. Келдыш (рис.2) был удостоен звания Героя Социалистического Труда, Д.Е. Охоцимский (рис.3) награжден орденом Ленина – прим. автора)."

По-видимому, в последнюю категорию попали и мы с Зариной Петровной Власовой, получив медаль "За трудовую доблесть" за решение задачи о точечном взрыве (рис.4).



Рис.2. М.В.Келдыш. **Рис.3.** Д.Е.Охоцимский. **Рис.4.** Р.К. Казакова и З.П. Власова.

В представляемой работе содержится решение задачи о точечном взрыве в однородной атмосфере. Текст, написанный Д.Е. Охоцимским, сохранен. История решения задачи такова.

В 1946г. Л.И. Седовым (рис.5) получено решение автомодельной задачи о сильном взрыве без учета противодействия [2]. В этой работе уравнения с частными производными для v , ρ и p (скорость, плотность, давление за скачком) заменяются обыкновенными дифференциальными уравнениями для других переменных (обозначенных V , R , P). Автомодельное движение хорошо согласуется с результатами эксперимента и может быть использовано для описания ранней стадии взрыва, когда давление за фронтом ударной волны еще достаточно велико. При дальнейшем развитии взрыва давление за фронтом падает, и влияние давления невозмущенного воздуха перед фронтом волны становится все более существенным.

Учет противодействия сильно усложняет задачу, при этом задача перестает быть автомодельной. Ее решение в точной постановке приводит к интегрированию системы уравнений с частными производными с использованием какого-либо численного метода. Численное решение задачи о точечном взрыве в однородной атмосфере методом характеристик дано в 1952г. в работе М.В. Келдыша и И.Л. Кондрашевой [3].

Расчет был доведен до значений перепада давления на фронте порядка 2,3. Расчет обнаружил важность учета противодействия. В работе показано, что метод характеристик для решения подобного рода задач дает потерю точности вблизи центра. А также вблизи волны при некотором ее ослаблении.



Рис.5. «Стекловак-1950», академик Л.И. Седов.



Рис.6. Клавишная машина "Мерседес".

Приближенный метод учета противодействия был предложен в 1953г. в работе Н.С. Бурновой [4]. Решение ищется методом вариаций. Автомодельное решение берется в качестве исходного. Этот метод также оказался непригодным.

В связи с этим М.В. Келдышем был предложен другой метод численного расчета, основанный на использовании метода сеток. Расчет методом сеток на ручных клавишных машинах типа "Мерседес" (рис.6) был доведен до значений перепала давления на волне порядка 17 и показал удовлетворительное совпадение с прежними расчетами методом характеристик.

В то время в Математическом институте им В.А. Стеклова АН СССР существовало расчетное бюро (РБ) под руководством Константина Адольфовича Семендяева (рис.7), которое вело расчеты ручным способом. В РБ была введена строжайшая дисциплина, установлена норма расчета точек в смену (кажется, около 1000 точек). Расчетчиками были в основном высококвалифицированные женщины, как правило, с университетским образованием. Тогда не было автоматических ручек, приходилось макать ручку в чернильницу. Говорят, что стена перед расчетчицами была забрызгана чернилами, так как левой рукой они нажимали на клавиши Мерседеса, а правой вписывали цифры в большие полотна (норма требовала скорости, поэтому летели брызги на стенку), которые затем передавали соседу для расчета другой характеристики. Какой они не знали. Что касается К.А. Семендяева, то он был неоднократно отмечен высокими правительственными наградами (в 50-х годах – орден Трудового Красного Знамени, трижды лауреат Сталинской премии, три ордена Ленина, в 1962г. – лауреат Ленинской премии).



Рис.7. К.А. Семендяев.

В работе отмечалось, что схема, неустойчивость которой сразу же выявилась при счете на электронной машине, была до этого весьма основательно опробована на ручных клавишных машинах. Было сосчитано около 20 шагов по времени (для настоящего времени это мизерное число шагов не могло стать основанием для каких-либо выводов). Однако никаких признаков неустойчивости при этом обнаружено не было, хотя счет велся по тем

же формулам, что и на электронной машине, и никакие сглаживания и выравнивания при счете не применялись. Причина этого явления не известна до сих пор.

Опыт проведения данной задачи на ЭВМ выявил чрезвычайно высокую эффективность использования автоматических быстродействующих цифровых машин для решения задач такого типа, а также перспективность их использования для решения задач, существенно более сложных и трудоемких.

Чтобы охарактеризовать производительность машины можно указать на то, что полный расчет одного шага по времени с выводом всех результатов на печать занимал около 2–3 минут, в то время как счет одного шага "на руках" занимал около двух дней работы двух квалифицированных вычислителей. На проведение всей задачи при ее двукратном решении было затрачено около 12÷14 часов машинного времени. Проведение всей задачи на руках потребовало бы около *года* работы двух вычислителей. При выполнении настоящей работы основное время было потрачено на подготовку задачи к проведению ее на машине и на обработку полученных результатов (этот текст того далекого времени ярко иллюстрирует восторг по поводу появления такого вычислительного "чуда"). Этим "чудом" [5] была наша первая советская вычислительная машина в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР, называвшаяся БЭСМ (Быстродействующая Электронная Счетная Машина) (рис.8) конструкции академика Сергея Алексеевича Лебедева. В ее создании принимали участие студенты МЭИ и других вузов. Среди них были Володя Мельников (рис.9), Сева Бурцев, ставшие впоследствии знаменитыми академиками. На рис.8 виден слева пульт с нанесенной схемой машины, а справа Володя Мельников проверяет один из блоков ламповой конструкции первой БЭСМ.



Рис.8. Первая советская быстродействующая электронно-счетная машина, 50-е годы.

Анализ полученных на БЭСМ результатов позволил дать полное описание картины развития взрыва при определенных начальных данных.



Рис.9. Академик С.А. Лебедев (справа) и В.А. Мельников.

Если вспомнить обстановку того времени, в котором считалась задача, то она выглядела так. Естественно, задача имела определенный гриф секретности. Поэтому исполнители имели специальные опечатанные портфели, в которых хранились все материалы, относящиеся к решаемой задаче: задания, рабочие тетради с формулами и даже с характеристиками БЭСМ, отрывные тетради, графики, расчеты и перепись документов, хранящихся в портфеле. Перфокарты с исходными данными также имели печать секретности. Уничтожение перфокарт проходило в присутствии сотрудников Особого отдела. Выводимые на печать результаты были зашифрованы.

Кстати, поскольку разговор пошел о секретности, то вспоминается факт, касающийся создания нашего Института прикладной математики (изначально институт назывался Отделением прикладной математики Математического института им. В.А.Стеклова – ОПМ МИАН СССР, причем официально мы считались "почтовым ящиком"). Известно, что Институт был создан в 1953г. в период укрепления оборонного щита Советского Союза. В Институт входили сотрудники, занимавшиеся атомной, космической тематикой и вычислительной математикой. Сюда вошли сотрудники Математического института им. В.А. Стеклова, будущего Вычислительного центра АН СССР, кибернетики во главе с Ляпуновым и довольно многочисленный состав во главе с Андреем Николаевичем Тихоновым. Интересно, что касается последних, то на вопрос: "Откуда вы пришли?". Они отвечали: "Из овощной базы". Шутка? А вот и нет. Совсем недавно я прочитала в книге Льва Петровича Феоктистова "Оружие, которое себя исчерпало" упоминание об "овощной базе", которая находилась напротив Цирка на Цветном бульваре, где проходило оформление документов сотрудникам, окончив-

ших физфак МГУ и получивших направление в неизвестное предприятие (в Арзамас). Не исключено, что там же находилась и расчетная группа, вошедшая также в наш Институт.

Постановка задачи

Рассматривается нетеплопроводный, лишенный вязкости газ, подчиняющийся уравнению состояния Клапейрона. Излучение не учитывается. Газ находится в покое. В момент времени $t=0$ происходит точечный взрыв, то есть мгновенное выделение в некоторой точке пространства конечной энергии E_0 . В результате взрыва образуется ударная волна, отделяющая область возмущенного движения газа от покоящегося газа. Движение предполагается сферически симметричным. Все характеристики движения газа зависят только от одной геометрической координаты r (расстояние от центра взрыва) и времени t . В качестве независимых переменных были взяты лагранжевы координаты t и s , где t – время, прошедшее с момента взрыва, s – координата частицы в момент прохождения через нее ударной волны. Основными искомыми функциями являются: расстояние от центра взрыва r , скорость частиц u , давление p , плотность ρ . Параметры задачи: E_0 , p_0 , ρ_0 , $\gamma=C_p/C_v$, где C_p – теплоемкость при постоянном давлении, C_v – теплоемкость при постоянном объеме. Расчет ведется в безразмерных переменных: лагранжева координата σ , время τ , давление p , плотность ρ , скорость u , эйлера координата ξ . Для большей наглядности приводятся размерные характеристики, отвечающие некоторым стандартным значениям энергии взрыва, давления и плотности в невозмущенной части пространства.

В качестве стандартного значения энергии взрыва взята энергия $E_0=8,54 \cdot 10^{12}$ кГ·м. Значение константы E при выбранном γ получается равным $E=\alpha E_0=1,175 E_0$ или в нашем случае $E=10,03 \cdot 10^{12}$ кГ·м. Величины p и ρ взяты соответствующими стандартным условиям у поверхности Земли $p_0=10321$ кГ/м², $\rho_0=0,125$ кГ·сек²/м⁴.

Расчеты были начаты от автомодельного решения при следующих значениях времени, расстояния ударной волны от центра взрыва и давления за фронтом:

$$\tau_0=0,00037119 \text{ (} t=0,001280 \text{ сек)}, \quad \xi=0,042448 \text{ (} r=42,05 \text{ м)},$$

$$\bar{p}=1743,3 \quad (p=1799 \text{ кГ/м}^2).$$

В основу расчета задачи о точечном взрыве была положена с некоторыми изменениями и дополнениями схема, основанная на методе сеток (рис.10) [6].

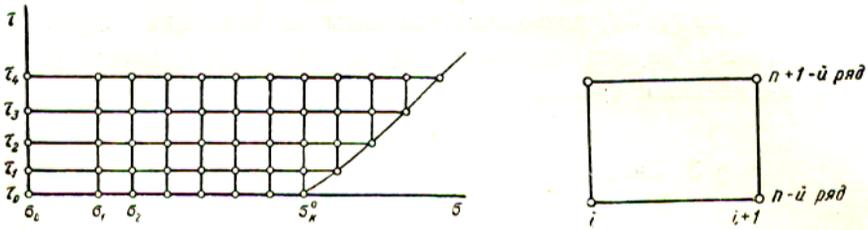


Рис.10. Схематическое изображение метода сеток.

Расчеты проводились в два этапа. Первый этап был закончен в конце 1954г., второй – в конце 1955г. Расчет доведен до перепада давления на ударной волне, равного 1,031 на первом этапе и до 1,005 на втором этапе. Надо осознать, в какой ситуации решалась эта задача. До этого времени гидродинамики строили, в меру возможностей, аналитические решения классических уравнений газодинамики для идеального газа – уравнений Эйлера, и достигли в этом определенных успехов. Введение в рассмотрение дополнительных факторов – противодействия, вязкости и т.п. приводило к тому, что применение аналитических методов сталкивалось с большими трудностями. В этот момент смелостью М.В. Келдыша, А.Н. Тихонова была осуществлена попытка соединить для решения, как сейчас говорят, технологической задачи,

- численные методы (с не существующей теорией на тот момент),
- первую ЭВМ (возможности которой в полном объеме не осознавали даже ее создатели)
- и постановку газодинамической задачи, хотя бы в какой-то мере делающей шаг к реальности.

Эта попытка была осуществлена с тщательностью, присущей нашей математической школе. Все совершенные действия фиксировались, все полученные результаты описывались, сколько бы парадоксальными и неожиданными они не казались.

Результаты расчетов

Результаты расчетов и их интерпретация сейчас, конечно, может вызывать улыбку у специалистов. Но это происходит только потому, что исследование проблем, с которыми мы тогда столкнулись, создавали многолетние работы, которые их решили, кстати, не полностью и на данный момент.

Неважно, в какой степени разработчики ядерного оружия использовали в тот момент наши расчеты, но в задаче приводятся заключения для основ-

ных характеристик процесса, интересующих "заказчиков". Приводятся соответствующие заключения, в частности, применительно к температуре. В точках, более удаленных от центра взрыва, например, для $\xi=0,2962$ (203,4 м) и $\xi=0,3522$ (348,9 м), после прохождения ударной волны температура несколько понижается за счет понижения давления, затем снова начинает возрастать при прохождении через эти точки более нагретого газа из области центра, и дальнейшее изменение температуры имеет тот же характер, что и для точек вблизи центра.

На больших расстояниях от центра для $\xi=0,6460 \div 1,938$ (640 ÷ 1920 м) температура тела повышается только в момент прохождения ударной волны и затем постепенно падает. В фазе разрежения она становится меньше наружной температуры. В дальнейшем температура постепенно приближается к температуре газа перед волной.

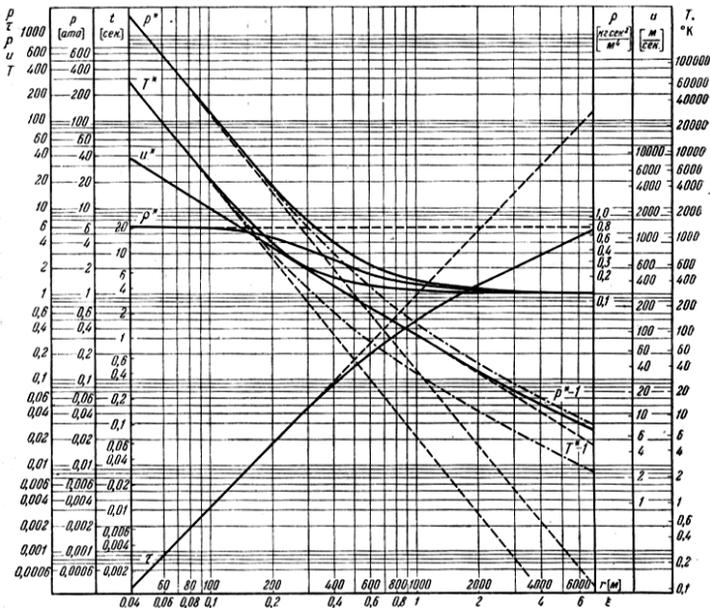


Рис.11. Параметры течения за фронтом ударной волны и время.

Далее приводятся результаты расчетов с 46 счетными интервалами. Приведем на наш взгляд наиболее показательный график (всего в работе приведены 23 графика для разных характеристик). Все графики начерчены нашими лаборантами, так как в то время не существовало графопостроителей, но, тем не менее, графики построены вполне на современном уровне.

На рис.11 приведены кривые (в логарифмической шкале) параметров течения (давление, скорость, температура, плотность, положение фронта волны), полученные из автомодельного решения (пунктирные линии) и в результате численных расчетов (сплошные линии). Хорошо видно, что автомодельные решения, как и должно это быть, представляют собой прямые. Численные решения, полученные с учетом противодействия на первых, малых временах совпадают с ними, а затем начинают сильно отличаться, причем качественно. Например, график давления достаточно быстро отклоняется от прямой и выходит на константу (в логарифмической шкале), также как и графики скорости и плотности. В частности, из этих расчетов следует ограниченность возможности применения рассматриваемого аналитического автомодельного решения в условиях учета противодействия.

В задаче рассчитано огромное количество таблиц. Одна из них приведена на рис.12.

Продолжение таблицы 1

τ	ξ^*	c	ρ^*	P_{II}
0,15478498	0,58615332	1,7863459	2,4925263	0,90752183
0,17338380	0,56881886	1,7269304	2,3185739	0,86325296
0,19257978	0,60154095	1,6766648	2,1760040	0,83111246
0,24075188	0,68006497	1,5883527	1,9225047	0,78789981
0,28279541	0,74597449	1,5262107	1,7744825	0,77671520
0,32624714	0,81084344	1,4817491	1,6629836	0,77986937
0,37087547	0,87613419	1,4463630	1,5766384	0,79243432
0,41649606	0,94159634	1,4176835	1,5081888	0,81090524
0,46296120	1,0068640	1,3940443	1,4527996	0,83265022
0,54835908	1,1375785	1,3607171	1,3692012	0,87889736
0,65517718	1,2682835	1,3309649	1,3095564	0,91923625
0,72426297	1,3596500	1,3163134	1,2772341	0,94230499
0,82415753	1,4902189	1,2994275	1,2404266	0,96695357
0,92521260	1,6207801	1,2860887	1,2115796	0,98311912
1,0272174	1,7513436	1,2751971	1,1884897	0,99288293
1,1300115	1,8819135	1,2662619	1,1695159	0,99826189
1,3374959	2,1430754	1,2524510	1,1405280	1,0019609
1,4420092	2,2736588	1,2470215	1,1292188	1,0021915
1,6944759	2,5670953	1,2367219	1,1079008	1,0016508
1,9062747	2,8483764	1,2302327	1,0945604	1,0011213
2,1190714	3,1096352	1,2250545	1,0839654	1,0007686

Рис.12. Пример таблицы (не до конца) параметров течения в зависимости от времени.

Были получены различные характеристики:

- зависимость от времени характеристик ударной волны на фронте и в центре;
- распределение давления, скорости частиц и плотности по радиусу для различных моментов времени τ ;

-изменение давления, скорости частиц, плотности и скорости звука с течением времени на различных расстояниях ξ от центра взрыва и ряд других параметров, теория расчета которых не была затронута в докладе.

Основным результатом проведенной работы явилось утверждение: *прикладные задачи (в данном случае механики сплошной среды) можно продуктивно решать с помощью численных методов, применяя ЭВМ.*

Это банальное по нынешним временам утверждение было, в общем-то, революционным. Легенда гласит, что на совещании, на котором Тихонов высказал это утверждение, Ландау сказал, что это невозможно, а если, тем не менее, будет сделано, то ЭТО будет научным подвигом. Этот подвиг был совершен усилиями многих людей, и данная работа явилась одной из первых, неизбежно несовершенной ступенью этого подвига. Эта работа, на самом деле, дала не столько ответы на поставленные вопросы, сколько во многом определила направления, по которым в дальнейшем развивалась прикладная математика.

В заключение я хотела бы привести слова крупнейшего ученого атомщика, Героя Социалистического Труда Льва Петровича Феокистова: "... если кто-то ... вознамерится сделать атомную бомбу ... мой вам совет, искреннее пожелание человека, который все это прошел: пусть ни ум ваш, ни руки не затронет эта тема" [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феокистов Л.П. Оружие, которое себя исчерпало. - М.: Российский комитет ВМПЯВ, 1999, 247 с.
2. Седов Л.И. Распространение сильных взрывных волн // ПММ, 1946, т.10, вып.2, с.241-250.
3. Келдыш М.В., Кондрашева И.Л. Взрыв в атмосфере с учетом противодействия. Отчет Математического института АН СССР. - М.: 1952.
4. Бурнова Н.С. Исследование задачи о точечном взрыве. Диссертация // РЖ Механика, 1953, №3.
5. Лебедев С.А. Электронные вычислительные машины. - М.: Изд. АН СССР, 1956, 47 с.
6. Охоцимский Д.Е., Кондрашева И.Л., Власова З.П., Казакова Р.К. Расчет точечного взрыва с учетом противодействия // Труды Математического института им. В.А.Стеклова. Л. Изд. АН СССР. - М.: 1957, 65 с.