

8. Компан М.Е., Сапурина И.Ю., Стейжжал Я., в сб. *1 Российская конф. по физическим проблемам водородной энергетики, Санкт-Петербург, 2004*, Тезисы докладов (СПб., 2004) с. 23
9. Горячев Д.Н., Малышкин В.Г., Забродский А.Г., в сб. *Международ. форум "Водородные технологии для производства энергии", Москва, 2005*, Тезисы докладов (М., 2006) с. 147

PACS numbers: 28.70.+y, 47.90.-x, 62.50.+p

Физические исследования при ядерных взрывах

Е.Н. Аврорин, В.А. Симоненко, Л.И. Шибаршов

1. Введение

Ядерные заряды ("атомные и водородные бомбы") — одни из самых наукоемких технических устройств, созданных человечеством. Они потребовали концентрации знаний по широкому кругу областей науки и привлечения огромных технических и финансовых ресурсов. В свою очередь, создание ядерных зарядов стимулировало изучение физических процессов, происходящих в условиях, недостижимых в лабораторных экспериментах.

При ядерных взрывах реализуются давления до нескольких миллиардов атмосфер, температуры до нескольких сотен миллионов градусов, возникают интенсивные потоки электромагнитных излучений в диапазоне от радиочастот до частот жестких гамма-квантов и нейтронов с энергией от нескольких долей электрон-вольта до нескольких десятков мегавольт. В процессе взрыва имеют место разнообразные физические процессы: ударные и детонационные волны, кумуляция, турбулентность, фазовые превращения, радиационный перенос энергии, диссоциация и ионизация, ядерные и термоядерные реакции.

Таким образом, ядерные взрывы открывают уникальные возможности для фундаментальных и прикладных научных исследований, к сожалению, не полностью использовавшиеся.

Отметим те направления, по которым велись достаточно широкие исследования и были получены значительные результаты.

1. Изучение термодинамических свойств веществ, уравнений состояния, фазовых превращений.
2. Измерение оптической (интегральной и спектральной) прозрачности плотной плазмы.
3. Исследования термоядерного горения и термоядерной детонации.
4. Исследования электромагнитных излучений, сопровождающих ядерные взрывы.
5. Изучение радиационного воздействия на материалы и технологические элементы.
6. Получение далеких трансурановых элементов.
7. Измерения нейтронных сечений.
8. Создание мощных оптических и рентгеновских лазеров.

Эти исследования проводились в СССР и США как в специальных опытах с использованием ядерного взрыва, так и попутно с испытаниями зарядов и некоторыми промышленными применениями.

В исследованиях по большинству указанных направлений в нашей стране определяющей была роль двух ядерных центров, которые сейчас носят названия: Рос-

сийский федеральный ядерный центр (РФЯЦ) "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (ВНИИЭФ) (г. Саров) и РФЯЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.И. Забабахина" (ВНИИТФ) (г. Снежинск). По отдельным направлениям существенный вклад внесли другие отраслевые и академические институты. В этих работах участвовали также многочисленные организации, обеспечивающие подготовку и проведение взрывов. В проведение конкретных экспериментов важный вклад вносили полигоны и их службы.

2. Измерения пробегов излучения — первый специализированный физический опыт (1957 г.)

На определенных этапах ядерного взрыва преобладающим механизмом переноса энергии является лучистая теплопроводность. Важная роль процессов переноса энергии путем лучистой теплопроводности сначала была осознана применительно к звездам. Теория таких процессов начала создаваться в 1930-х годах. В составе вещества подавляющего большинства звездных объектов преобладают элементы с малыми атомными номерами. При этом основными механизмами взаимодействия квантов излучения с веществом являются тормозное взаимодействие и комптоновское рассеяние.

При ядерных взрывах возникают плотности энергии, величины которых сопоставимы со значениями, характерными для звездных объектов. Однако в случае ядерных взрывов положение осложняется тем, что в зарядах находятся вещества с большими атомными номерами. При высоких температурах они подвергаются многократной ионизации и имеют сложные энергетические спектры. В таких условиях существенный вклад во взаимодействие излучения с веществом начинают вносить переходы между возбужденными состояниями, процессы ионизации. Набор энергетических уровней, их состояние существенно зависят также от термодинамических условий. Получение этих данных даже сейчас представляет собой весьма сложную задачу, а в те далекие времена не была даже ясна важность роли этих процессов. Однако результаты испытаний уже первых систем, использующих радиационное обжигание, косвенно указывали на неточность имеющихся в то время данных по переносу излучения.

Поэтому в 1950-х годах одной из важнейших задач стало получение экспериментальной информации по пробегам излучения в веществах с высоким атомным номером. В 1956 г. для этой цели по инициативе руководителей ВНИИЭФ Я.Б. Зельдовича, А.Д. Сахарова, Ю.Б. Харитона был подготовлен и проведен физический опыт (ФО-1) с полномасштабным ядерным взрывом. Однако по методическим причинам (недостаточный учет воздействия радиационных потоков на средства регистрации) экспериментальную информацию получить не удалось. В 1957 г. аналогичный опыт (ФО-3) взялся провести молодой коллектив второго советского ядерного центра (ВНИИТФ). Схема установки, использованной в ФО-3, показана на рис. 1 (высота установки около 5 м, поперечный размер около 2 м).

Основные участники ФО-3:

Исходное предложение — Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров.

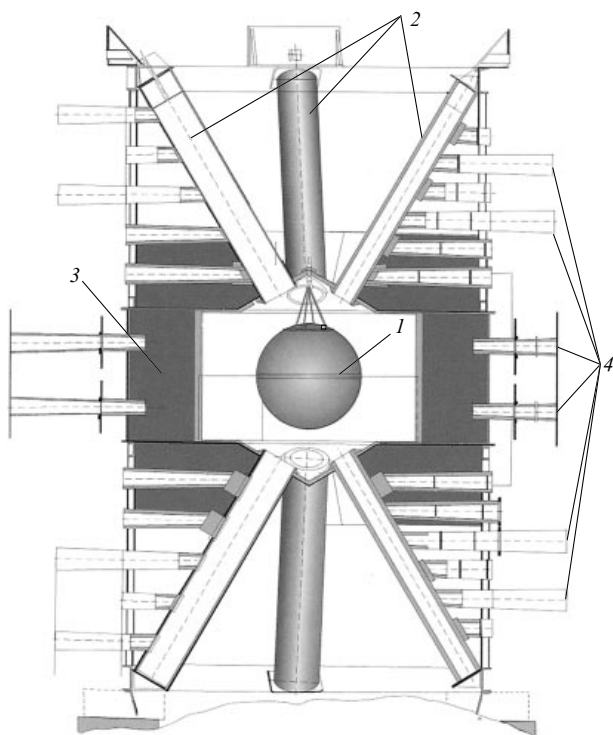


Рис. 1. Схема установки ФО-3: 1 — заряд; 2 — трубы для вывода излучения; 3 — бак с водой; 4 — световые каналы.

Инициатива проведения данного опыта — К.И. Щелкин, Е.И. Забабахин, Ю.А. Романов, В.С. Имшенник.

Научное руководство — Ю.А. Романов.

Выбор редакции опыта, расчетно-теоретические работы, обработка результатов — Е.Н. Аврорин.

Конструкторские работы — В.Ф. Гречишников, В.Д. Кирюшкин, А.С. Красавин.

Физические измерения — А.Д. Захаренков, В.К. Орлов, А.С. Дубовик, П.В. Кевлишвили.

Руководство проведением опыта на полигоне — В.Ю. Гаврилов.

Исходная идея опыта основывалась на том, что затухание потоков энергии вдоль труб зависит от теплопроводности стенок: чем больше теплопроводность стенки, тем быстрее затухает поток энергии. Энергия, поглощенная отдельными участками стенок труб, определялась по скорости ударной волны в измерительных элементах, вмонтированных в стенки. Момент выхода волны на наружную поверхность элемента фиксировался по появлению оптической вспышки. С учетом опыта ФО-1 особое внимание уделялось надежности измерений. Большую помощь в выборе надежной редакции опыта оказал Я.Б. Зельдович. Регистрация оптического излучения проводилась с расстояний от 2 до 5 км посредством скоростных фоторегистраторов, разработанных в Институте химической физики АН СССР. Примеры фотохронограмм, полученных в опыте, приведены на рис. 2.

Обширный экспериментальный материал, полученный в ФО-3 (а также обработка результатов ряда испытаний термоядерных зарядов, проведенная М.П. Шумаевым), подтвердили необходимость учета влияния связанно-связанных переходов.

Результаты опытов стимулировали интенсивное развитие квантово-механических моделей для расчета

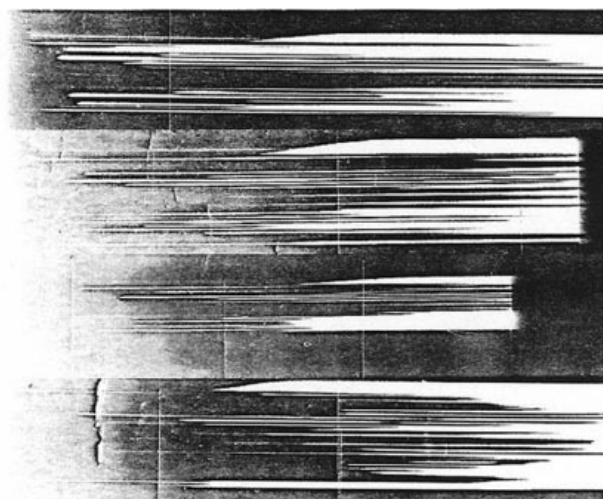


Рис. 2. Примеры фотохронограмм ФО-3. 1 мм на пленке соответствовал ~ 40 нс.

непрозрачностей веществ. Важнейший вклад в развитие теоретических работ внесли Я.Б. Зельдович и Ю.Н. Бабаев. Непосредственная разработка теоретических моделей и алгоритмов вычислений, накопление расчетных данных осуществлялось в Институте прикладной математики АН СССР А.Ф. Никифоровым, В.Б. Уваровым [1] и их сотрудниками.

3. Изучение уравнений состояния и фазовых превращений веществ при динамических нагрузках

В программу большого числа специальных физических опытов и испытаний ядерных зарядов входили работы по изучению свойств веществ в динамических процессах при рекордно высоких давлениях (до 3,6 Гбар) [2, 3]. Наиболее просто были реализованы измерения ударно-волновой сжимаемости методом отражений, разработанным для исследований с помощью химических взрывчатых веществ Л.В. Альтшулером, К.К. Крупниковым и др. [4, 5]. Этот метод предполагает, что известно уравнение состояния эталонного вещества (обычно в качестве эталона использовались Fe или Al).

Натурный опыт с постановкой таких измерений впервые был проведен сотрудниками ВНИИТФ в марте 1966 г. Схема постановки таких опытов и проведения измерений была разработана В.А. Симоненко, К.К. Крупниковым и Л.П. Волковым.

В качестве примера на рис. 3 показана одна из модификаций схемы постановки измерений. В горном массиве вокруг бокса с зарядом создавалась обводная выработка, в которой сооружались ниши для размещения измерительных блоков. Измерительные блоки размещались на гладких площадках, изготовленных в горной породе. Гладкая поверхность устанавливалась перпендикулярно направлению на центр взрыва. Регистрация моментов прихода ударной волны в заданные точки осуществлялась с помощью электроконтактных датчиков.

Уже в первом опыте была реализована расширенная программа с постановкой шести измерительных блоков. С помощью одного из них измерялась ударная сжимаемость гранита относительно ударной сжимаемости железа. Была получена точка на ударной адиабате

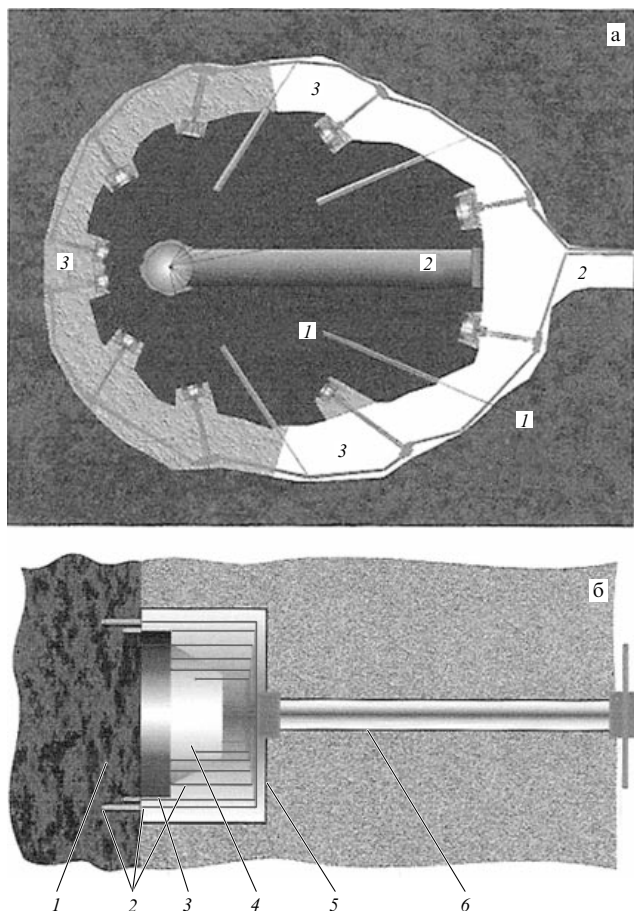


Рис. 3. (а) Схема опыта по изучению относительной сжимаемости различных веществ: 1 — массив горной породы; 2 — основная штольня; 3 — кольцевая проходка. (б) Схема устройства и размещения измерительного блока: 1 — горная порода; 2 — контактные датчики; 3 — эталонное вещество; 4 — исследуемый образец; 5 — защитный кожух; 6 — защитная труба с кабелями.

гранита при давлении в два раза выше достигнутого к тому времени в лабораторных экспериментах. В дальнейшем были уточнены ударные сжимаемости воды и алюминия, зафиксировано влияние процесса плавления на эволюцию фронта ударной волны в кварците. Всего за время проведения подземных испытаний специалисты ВНИИТФ провели исследования с применением более 60 измерительных блоков. В частности, такая же постановка измерений применялась при проведении последнего ядерного испытания института в 1988 г. В этом опыте были получены ценные данные по ударной сжимаемости кварцита и по раздвоению волны в кварце в области фазового перехода кварц—стишовит [6] по ударному сжатию пористого алюминия.

В аналогичной постановке проводились исследования сотрудниками ВНИИЭФ первоначально под руководством Л.В. Альтшулера, а затем Р.Ф. Трунина. Результаты представлены в обзорах [5].

По совокупности данных можно сделать вывод о существовании двух фазовых переходов в кварците: при давлении 230–350 кбар (переход от обычной фазы к высокоплотной) и при давлении около 1,15 Мбар (плавление) [7]. На рисунке 4 показана ударная адиабата в области смены фаз.

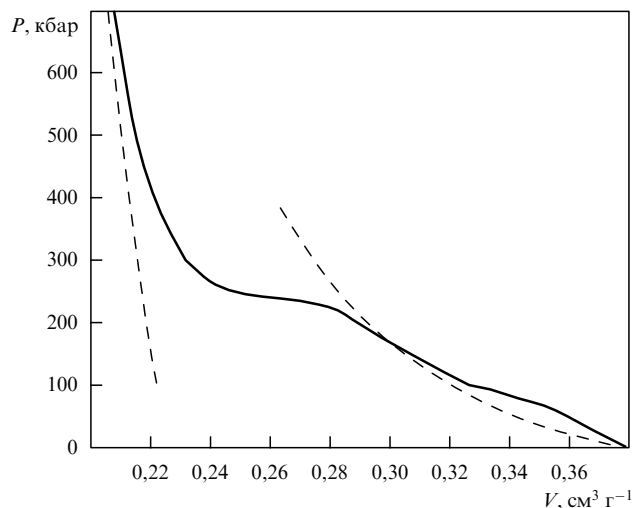


Рис. 4. Сплошная кривая — обработка экспериментальных данных, штриховая кривая — расчетные адиабаты для обычной и высокоплотной фаз.

Первоначально для построения широкодиапазонных уравнений состояния использовались данные модели Томаса—Ферми (ТФ) с различными поправками [8–11]. Однако модель ТФ не учитывает нерегулярное влияние электронных оболочек атомов. В ряде подземных ядерных взрывов исследовалось, в какой мере оно сказывается при ударно-волновых сжатиях плотных сред. Были выполнены методом отражения измерения ударной сжимаемости алюминия, свинца, воды и кварца относительно ударной сжимаемости железа [12, 13] при рекордно высоких давлениях. Экспериментальные данные по ударным адиабатам алюминия и свинца представлены в табл. 1 [14].

Эта информация позволяет судить о применимости различных теоретических моделей в обсуждаемой области [15–19].

Описанные выше результаты были получены относительным методом, предполагающим знание уравнения состояния эталонного вещества.

Абсолютные измерения ударно-волновой сжимаемости требуют одновременного измерения массовой скорости и скорости ударной волны. Известные лабораторные методы определения массовой скорости имеют физические ограничения при высоких давлениях и скоростях.

Таблица 1. Ударные адиабаты

Алюминий			Свинец		
D , км с ⁻¹	P , Мбар	$\delta = \rho/\rho_0$	D , км с ⁻¹	P , Мбар	$\delta = \rho/\rho_0$
43,57	36,3	3,73	30,42	79,6	4,13
49,45	48,5	4,00	35,0	107,2	4,37
50,53	50,6	4,05	35,44	111,6	4,60
65,22	87,3	4,55	46,6	197,3	5,00
75,03	115,9	4,61	53,43	262,4	5,26
80,11	132,5	4,66	56,98	300,2	5,40
85,98	152,5	4,64	61,33	346,5	5,31
107,10	237,9	4,73	76,7	543,8	5,39

Примечание. D — скорость ударной волны, P — давление на фронте, ρ_0 и ρ — начальная плотность вещества и плотность за фронтом ударной волны соответственно.

Американские исследователи [20] предложили схему измерений массовой скорости в области высоких давлений, которая основана на смещении резонансов взаимодействия нейтронов с ядрами движущегося вещества по отношению к их положению у покоящихся ядер (доплеровский сдвиг).

Наиболее ярко резонансы выражены у молибдена, который и исследовался в [20]. В уране было реализовано давление $P \approx 90$ Мбар, в молибдене зафиксированы скорость ударной волны $D = 18,7$ км с⁻¹ и массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 10,2$ км с⁻¹. Достигнутая в измерениях скорости точность $\pm 5\%$ не позволяет использовать полученную экспериментальную точку для калибровки уравнений состояния молибдена. Главные источники погрешности измерений связаны с неопределенностью длительности источника нейтронов и различными механизмами размытия резонансов, однако вклад в погрешность многих из этих факторов ослабевает с увеличением массовой скорости, так что при $U \approx 100$ км с⁻¹ имеется принципиальная возможность достижения точности $\Delta U/U \approx 1\%$.

В работе [21] предложен способ одновременного измерения величин D и U с помощью гамма-активных реперных слоев, внедренных в исследуемое вещество; интенсивный гамма-источник может быть получен при импульсном облучении нейтронами вещества, ядра которого обладают сечением радиационного захвата, превосходящим в $\sim 10^3$ раз соответствующие сечения исследуемого вещества. В реперных слоях можно использовать европий, для которого при $E_n = 10-100$ эВ сечение (n, γ)-реакции составляет $\sigma = 220 \pm 80$ б. В процессе газодинамического движения реперные слои увлекаются движущимся веществом. С помощью системы коллимирующих щелей фиксируются моменты прохождения ими контрольных положений (рис. 5).

В применении метода отражения в качестве эталонного вещества широко использовался алюминий. В области давления 5–150 Мбар имеются существенные неоднозначности в уравнении состояния этого вещества. Это и обусловило интерес к алюминию в первых применениях нового метода. Результаты измерений с учетом последних методических достижений при обработке осциллограмм, учета нестационарности движений и реперных слоев приведены в табл. 2.

Опыт применений гамма-реперного метода измерений ударной сжимаемости показывает, что имеются

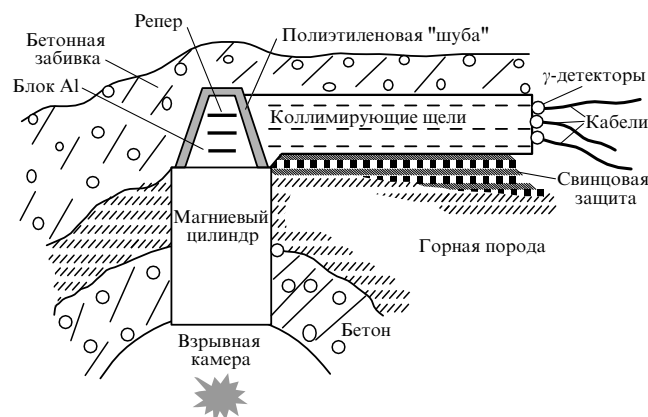


Рис. 5. Схема опыта с гамма-реперами.

Таблица 2. Результаты абсолютных измерений в алюминии

№ опыта	ρ_0 , г см ⁻³	D , км с ⁻¹	U , км с ⁻¹	P , Мбар	$\delta = \rho/\rho_0$
1	2,71	$24,2 \pm 0,7$	$15,1 \pm 0,4$	$9,9 \pm 0,3$	$2,65 \pm 0,1$
2	2,71	$23,4 \pm 0,6$	$14,5 \pm 0,3$	$9,3 \pm 0,2$	$2,63 \pm 0,07$
3	2,71	40 ± 5	30 ± 2	32 ± 5	$3,9 \pm 1,2$

большие возможности совершенствования его при использовании различных сочетаний репера и исследуемого материала.

4. Исследования термоядерного горения

В ряде взрывных экспериментов изучались условия термоядерного воспламенения дейтерия и дейтериево-тритиевой смеси.

Теоретический критерий термоядерной вспышки был получен в работе сотрудников ВНИИТФ и ВНИИЭФ [22].

Обобщение критерия на случай неоднородного сжатия и нагрева термоядерного горючего проведено в работе [23].

Проблема термоядерного воспламенения оказалась очень сложной. В 1956–1962 гг. оба института предпринимали ряд попыток воспламенить "чистые" узлы (конструкции, содержащие термоядерное горючее, но не содержащие делящихся материалов).

Впервые это удалось в 1963 г. (ВНИИЭФ, В.Б. Адамский, В.Н. Мохов, Ю.А. Трутнев).

Важнейшее значение имел опыт, проведенный в 1965 г. ВНИИТФ по предложению Л.П. Феоктистова. В этом опыте было получено воспламенение дейтериевого и дейтерий-тритиевого узлов и начато исследование возможности термоядерной детонации.

Руководство опытом — Е.И. Забабахин.

Конструкторские работы — Б.В. Литвинов.

Расчетно-теоретические работы — Л.П. Феоктистов, Е.Н. Аврорин, А.К. Хлебников, Л.И. Шибаршов, Е.Г. Гамалий.

Физические измерения — Ю.А. Зысин, А.И. Сауков, В.Г. Рукавишников.

На основании результатов этого физического опыта в 1966 г. было осуществлено горение газообразного дейтерия с мощностью около 100 кт. В 1972 г. в результате совместных работ ВНИИЭФ и ВНИИТФ было проведено испытание рекордного по "чистоте" (с минимальным количеством радиоактивных продуктов) промышленного заряда мощностью 140 кт с возможностью практически неограниченного увеличения мощности (Ю.С. Вахрамеев, В.Н. Мохов, А.В. Певницкий, Е.Н. Аврорин, Б.В. Литвинов, Б.П. Мордвинов).

В 1967 г. был проведен опыт по определению пределов зажигания газообразного дейтерия (испытан набор термоядерных узлов различных размеров). Предельные размеры оказались весьма близкими к расчетным.

В нескольких опытах была предпринята попытка моделирования мишени для лазерного термоядерного синтеза. Однако не удалось обеспечить термоядерное воспламенение таких моделей. По-видимому, причиной являлась недостаточная точность изготовления моделей и неоднородность облучения.

Интерес к термоядерной детонации труб, заполненных дейтериево-тритиевой (ДТ) смесью (ДТ-шнуров), возник в 1970-х годах с точки зрения возможности

получения неограниченного выигрыша в энергии в инерциальном термоядерном синтезе.

Во ВНИИТФ по инициативе Л.П. Феокистова начались теоретические, а затем и экспериментальные исследования детонации.

Теоретически детонация изучалась как путем расчетного моделирования [24], так и с помощью аналитических расчетов и оценок [25].

Термоядерная детонация оказалась, по выражению Л.П. Феокистова, заметно более "физически насыщенной", чем детонация взрывчатых веществ (ВВ).

Приходится учитывать разнообразные физические явления:

- термоядерные реакции;
- электронную и фотонную теплопроводность;
- гидродинамическое движение;
- перенос альфа-частиц;
- перенос нейтронов.

В зависимости от параметров ведущим оказывается тот или иной процесс: имеет место либо "гидродинамическая" детонация, либо сверхзвуковая волна горения.

Л.П. Феокистову и его сотрудникам удалось получить оценку для основных параметров термоядерной детонации: скорости детонации и предельного размера детонирующего шнура. Любопытное совпадение: предельный диаметр для термоядерной детонации дейтерий-тритиевой смеси по порядку величины оказался близким к критическим диаметрам мощных ВВ.

В ряде экспериментов эти оценки подтвердились с приемлемой точностью. С помощью энергии ядерного взрыва производилось предварительное сжатие ДТ-шнуров и зажигание. Было достигнуто сжатие ДТ-смеси до $\sim 10 \text{ г см}^{-3}$. Диаметры сжатых шнуров были на 2–3 порядка меньше их длины. В экспериментах детонация прекращалась при диаметре, несколько большем, чем по расчетным предсказаниям. По-видимому, это связано с неоднородностью сжатия и нагрева термоядерной смеси.

Измерены скорость детонации в пределах от 5×10^8 до $8 \times 10^8 \text{ см с}^{-1}$ и максимальные температуры 50–70 кэВ в согласии с теорией. На рисунке 6 в качестве примера показан полученный после одного из опытов фотоотпечаток интегральных по времени нейтронных изображений нескольких ДТ-шнуров.

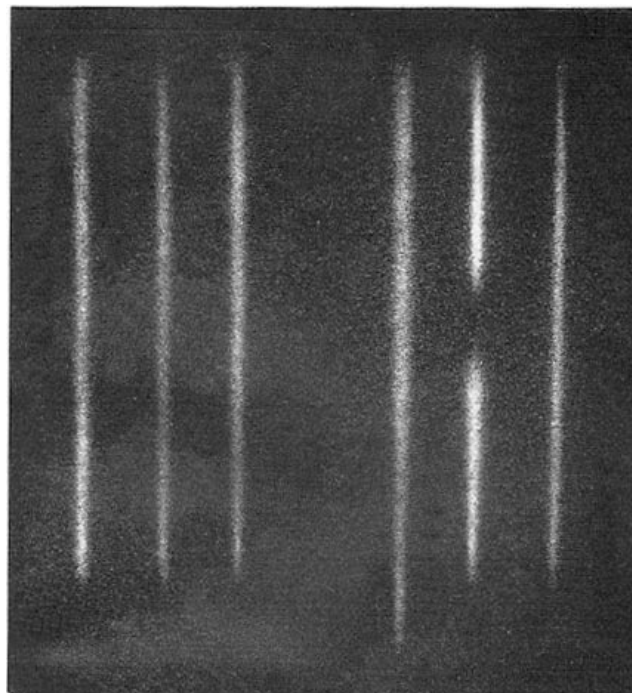


Рис. 6. Изображения детонирующих шнуров.

5. Комплексный физический опыт 1983 года

Программа эксперимента включала в себя измерения ударной сжимаемости алюминия и свинца относительно таковой железа, а также сжимаемости железа относительно таковой свинца методом отражения (часть горизонтальных каналов). По другим каналам осуществлялись измерения усредненных и спектральных значений оптической прозрачности в алюминии и железе (вторая часть горизонтальных каналов), изучение режимов термоядерной детонации (верхняя часть установки). Схема установки опыта показана на рис. 7.

Для получения информации при максимальных давлениях измерительные блоки размещались в непосредственной близости к ядерному заряду. Большие радиационные потоки не позволили использовать электрорезистивные датчики, поэтому применялась оптическая регистрация.

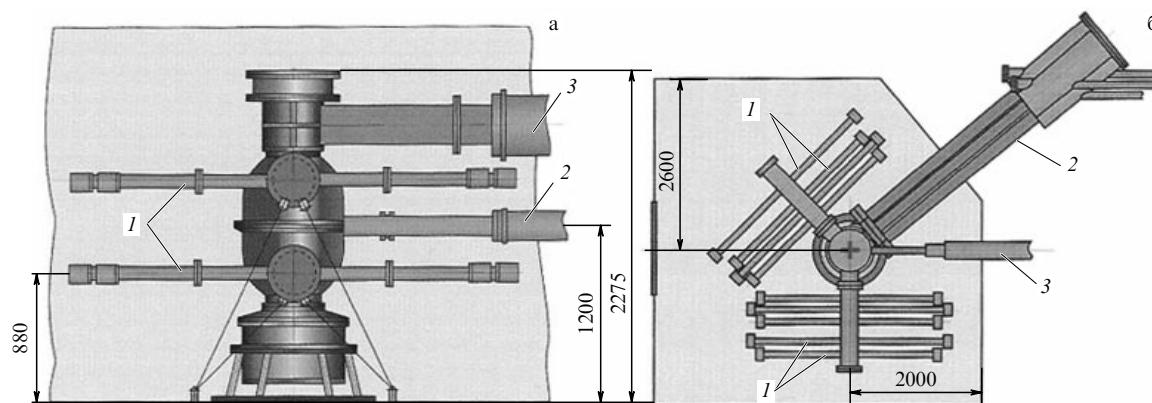


Рис. 7. Схема установки комплексного опыта 1983 г.: (а) вид сбоку, (б) вид сверху. 1 — световые каналы для ударно-волновых и интегральных оптических измерений; 2 — каналы спектральных оптических измерений; 3 — каналы для регистрации термоядерной детонации.

В опыте были получены данные по ударной сжимаемости алюминия и свинца относительно сжимаемости железа, а также сжимаемости железа относительно таковой для свинца, уточнены пробеги излучения (интегральные и спектральные) и измерены основные параметры термоядерной детонации.

6. Получение трансурановых изотопов

Используя интенсивные нейтронные потоки ядерного взрыва, американские и советские ученые получили ряд новых изотопов трансурановых элементов [26, 27]:

- ^{244}Pu , ^{245}Pu , ^{246}Pu ;
- ^{246}Am ;
- ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm ;
- ^{249}Bk ;
- ^{249}Cf , ^{252}Cf , ^{253}Cf , ^{254}Cf ;
- ^{253}Es , ^{255}Es ;
- ^{255}Fm .

В конце 1980-х годов началось сотрудничество советских ядерных центров с американскими ядерными лабораториями. В частности, были начаты обсуждения возможности проведения международных научных экспериментов с использованием энергии ядерного взрыва.

Мораторий на ядерные испытания, объявленный СССР в 1989 г., и последующее заключение Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний вызвали прекращение таких исследований.

Список литературы

1. Никифоров А Ф, Новиков В Г, Уваров В Б *Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы: Методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния* (М.: Физматлит, 2000)
2. Аврорин Е Н, Водолага Б К, Симоненко В А, Фортон В Е *УФН* **163** (5) 1 (1993)
3. Трунин Р Ф *УФН* **164** 1215 (1994)
4. Альтшулер Л В *УФН* **85** 197 (1965)
5. Альтшулер Л В, Зельдович Я Б, Стяжкин Ю М *УФН* **167** 107 (1997); Альтшулер Л В и др. *Вестн. РАН* **74** 1011 (2004)
6. Вильданов В Г и др. *Химическая физика* **14** (2–3) 122 (1995)
7. Жугин Ю Н и др. *Физика Земли* **35** (6) 46 (1999)
8. Latter R *Phys. Rev.* **99** 1854 (1955)
9. Киржниц Д А *ЖЭТФ* **32** 115 (1957)
10. Калиткин Н Н, Кузьмина Л В, Препринт № 35 (М.: ИПМ АН СССР, 1975)
11. Копышев В П *Численные методы механики сплошных сред* **8** (6) 54 (1977)
12. Аврорин Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **31** 727 (1980)
13. Аврорин Е Н и др. *ЖЭТФ* **93** 613 (1987)
14. Аврорин Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **43** 241 (1986)
15. Трошин О В *Изв. вузов. Сер. Физ.* (4) 57 (1968)
16. Zink J W *Phys. Rev.* **176** 279 (1968)
17. Синько Г В *Численные методы механики сплошных сред* **10** (3) 124 (1979)
18. Никифоров А Ф, Новиков В Г, Уваров В Б, в сб. *Математическое моделирование. Физико-химические свойства вещества* (Отв. ред. А А Самарский, Н Н Калиткин) (М.: Наука, 1989) с. 162
19. More R M et al. *Phys. Fluids* **31** 3059 (1988)
20. Ragan III C E, Silbert M G, Diven B C *J. Appl. Phys.* **48** 2860 (1977)
21. Симоненко В А и др. *ЖЭТФ* **88** 1452 (1985)
22. Вахрамеев Ю С, Мохов В Н, Попов Н А *Атомная энергия* **49** (2) 91 (1980)
23. Аврорин Е Н, Феоктистов Л П, Шибаршов Л И *Физика плазмы* **6** 965 (1980)
24. Аврорин Е Н и др. *Физика плазмы* **10** 514 (1984)
25. Феоктистов Л П *УФН* **168** 1247 (1998)
26. Ingley J S *Nucl. Phys. A* **124** 130 (1969)
27. Адамский В Б *Атомная энергия* **81** 207 (1996)