

25. Михайлов А. Л. *Физическая мезомеханика* **10** (5) 53 (2007)
26. Огородников В. А. и др. *ФГВ* **34** (6) 103 (1998) [Ogorodnikov V. A. et al. *Combustion Explosion Shock Waves* **34** 696 (1998)]
27. Невмержицкий Н. В. и др., в сб. *Межд. семинар по физике турбулентного перемешивания сжимаемых сред, Россия, Москва, 2010*
28. Михайлов А. Л. *ФГВ* **15** (2) 158 (1979)
29. Drennov O. B. et al., in *Proc. of the APS Conf. SCCM-2001, Atlanta, USA, 2001*, p. 595

PACS numbers: 05.70.Ce, **07.35.+k**, **47.40.-x**
 DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104j.0416

Исследования экстремальных состояний металлов с использованием ударных волн

Р.Ф. Трунин

1. Введение

Начало исследований, о которых пойдёт речь, относится к 1947 г., когда перед газодинамиками КБ-11 (сейчас Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ — ВНИИЭФ)) была поставлена задача исследования ударно-волновых свойств веществ, входящих в состав создаваемой в Советском Союзе атомной бомбы. Эти свойства нужны для проведения расчётного выбора её конструкции, поскольку созданное на их основе уравнение состояния, т.е. функциональная связь давления, плотности и энергии, замыкало систему уравнений движения и тем самым позволяло оценить параметры сжатия активных и других веществ.

Первопроходцами экспериментальных исследований этого направления у нас были Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников, В.А. Цукерман, Б.Н. Леденёв, В.И. Жучихин, С.Б. Кормер и их сотрудники. Активно участвовали в разработке методов исследования и интерпретации получаемых результатов также сотрудники теоретических отделений Я.Б. Зельдович, Е.И. Забабахин, Г.М. Гандельман, Н.А. Дмитриев, В.П. Копышев и др. В научно-организационном плане неопенимой была роль Ю.Б. Харитона.

Предложенные способы определения параметров сжатых ударными волнами веществ позволили уже в 1947 г. провести первые измерения их характеристик.

Первым веществом, от знания свойств которого в определённый момент зависел результат испытания бомбы, было взрывчатое вещество (ВВ), входящее в её состав. Многим известна эпопея с получением параметров детонации этого ВВ (см., например, [1]), поэтому я не буду на ней останавливаться. Отметим лишь, что только благодаря Зельдовичу удалось устранить имеющиеся тогда различия в детонационных параметрах и тем самым снять острейший вопрос об испытании бомбы.

Первым, исследованным в 1947 г., металлом стал уран, сжатие которого было изучено при давлениях вплоть до 500 кбар.

Р.Ф. Трунин. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ
 E-mail: root@gdd.vniief.ru

Измерения сначала проводились с использованием метода "откола", который, вследствие его небольшой точности, вскоре уступил место абсолютному методу "торможения" [2] и основанному на его принципах методу "отражения" [3].

Большинство измерений, результаты которых частично будут представлены в разделах 3–5, проведено двумя последними методами. Согласно им в опытах определяются два кинематических параметра: скорость ударной волны в образце D и скорость перемещения вещества за фронтом — так называемая массовая скорость U .

Скорость ударной волны в обоих методах определяется легко — надо лишь на пути её распространения в исследуемом образце установить датчики любого типа, реагирующие на высокие давления фронта, и зарегистрировать время прохождения волны между ними.

Для определения массовой скорости разработаны специальные способы, позволяющие косвенно определить этот параметр. Ознакомиться с ними можно по первоисточникам [2, 3]. Здесь мы лишь напомним, что в методе торможения, предложенном Альтшулером, скорость W подлетающего к мишени ударника в точности равна удвоенному значению массовой скорости U в мишени (если ударник и мишень состоят из одного материала). При применении метода отражения (Альтшулер, Крупников, Гандельман) должно быть известно уравнение состояния материала экрана, прикрывающего образцы со стороны подходящей к ним ударной волны, и параметры этой волны в экране. Массовая скорость U в исследуемом веществе находится из рассмотрения распада произвольного разрыва на диаграмме давление — массовая скорость.

Термодинамические параметры сжатого вещества — давление, плотность и энергия ударного сжатия — находятся через эти кинематические величины из законов сохранения импульса $P - P_0 = DU/V_0$, массы $V/V_0 = (D - U)/D$ и энергии $E - E_0 = 0,5(P + P_0)(V_0 - V)$. Здесь P , V и E — давление, удельный объём и внутренняя энергия, индекс "0" относится к начальным значениям этих величин. Температура ударно-сжатых веществ непосредственно не измеряется, а находится из уравнения состояния (УРС), сконструированного на основе этих параметров.

Уравнения сохранения определяют так называемую адиабату Гюгоньо — адиабату исследуемого вещества $P_H = P_H(V, P_0, V_0)$, представляющую собой совокупность термодинамических состояний, возникающих в результате ударного сжатия вещества, находившегося в исходном состоянии при P_0 и V_0 .

Адиабата Гюгоньо — основной источник экспериментальной информации, на основе которого находятся уравнения состояния веществ. Другие ударно-волновые характеристики веществ: скорости звука за фронтом ударной волны, адиабаты расширения и двукратного сжатия, температуры ударного сжатия и т.п. непосредственно связаны с ударной адиабатой и во многом ею определяются. Именно поэтому при нахождении уравнений состояния веществ основное внимание уделяется исследованиям ударных адиабат.

Замечательным свойством ударных адиабат является то, что в $D-U$ -координатах в широких диапазонах изменения этих параметров они аппроксимируются линейными или близкими к линейным зависимостями.

Это правило — линейность $D(U)$ — показано экспериментально в широких диапазонах изменения D и U в нескольких сотнях случаев исследования различных веществ — от газообразных до твёрдых в исходном состоянии. Конечно, такое представление является некоторым приближением к действительности, поскольку реально существуют "возмущения" на линейных представлениях $D(U)$, связанные с физическими процессами, происходящими при ударном сжатии: плавлением, испарением, диссоциацией и т.п. Это приводит к отклонениям от линейности, но не настолько большим, чтобы нельзя было говорить об общей тенденции-правиле — линейности адиабат на $D-U$ -диаграммах.

Следует сказать и ещё об одном свойстве ударных адиабат, показанном экспериментально. При высоких параметрах ударных волн ($D > 10-15$ км с⁻¹) ударные адиабаты "выходят" на единый наклон $D'_U \approx 1,2$, характерный как для разных веществ, так и для веществ с разными исходными плотностями.

Для определения кинематических параметров D и U во ВНИИЭФ используются в основном два типа измерительных устройств: "плоские" устройства [4], создающие в исследуемых образцах плоскую стационарную ударную волну, и сферические (точнее, полусферические) [5], в которых формируются сферические ударные волны, "сходящиеся" к центру системы.

Почти до конца прошлого века существовал и третий источник ударных волн, существенно превосходящий первые два. Это созданные подземными ядерными взрывами мощные ударные волны в горных породах, которые можно было использовать в качестве инструмента для решения исследовательских задач [6].

Может возникнуть вопрос: зачем вообще нужно стремиться к увеличению давлений? Ведь ещё в 1947 г. получено давление 0,5 Мбар в уране! Может быть, этим и ограничиться? Но при работе атомного заряда сжатие входящих в него веществ осуществляется при разных давлениях, в том числе во много раз превышающих указанную величину. Поэтому исследовать эти состояния было необходимо. Чем в течение последующих лет активно и занималась наша лаборатория.

2. Измерительные устройства

Универсальным измерительным устройством для определения ударного сжатия веществ является предложенный в 1948 г. Альтшулером, Забабахиным, Зельдовичем и Крупниковым полусферический измерительный заряд. Его схематическое устройство неоднократно демонстрировалось во многих публикациях (см., например, [5, 7, 8]) и поэтому здесь не приводится. Напомним лишь, что заряд представляет собой полусферу из мощного взрывчатого вещества, которая одновременно инициируется по всей своей внешней поверхности. Во внутреннюю (также полусферическую) полость заряда вложена стальная полусфера — ударник, — которая продуктами взрыва сходящейся детонационной волны разгоняется к центру системы и на выбранном для исследований радиусе ударяет по мишени с исследуемыми образцами, транслируя в них сходящуюся ударную волну. Первые измерительные устройства этого типа обладали рядом недостатков (недостаточно хорошая симметрия сходящейся ударной волны, неопределённость учёта нестационарности волн, разнородность взрывчатого состава и т.п.). Поэтому в 1960-х годах эти устройства были

усовершенствованы [5, 7, 8] в плане сведения к минимуму упомянутых и других недостатков: было использовано более мощное и вместе с тем более стабильное по плотности взрывчатое вещество, фокусирующая система заменена более совершенной. Это привело к заметному улучшению симметрии волн, что, в свою очередь, позволило уменьшить толщины образцов и сделало более определённым учёт нестационарности. Между ударником и ВВ был установлен воздушный зазор, смягчающий давление первой волны, выходящей на ударник. Эти и некоторые другие изменения способствовали стабилизации исходных параметров заряда. Скорость оболочки, измеренная на различных радиусах её движения, изменяется от 7 км с⁻¹ на "высоких" радиусах до 23 км с⁻¹ на "глубоких".

Современная схема заряда была отработана Л.В. Альтшулером, А.А. Бакановой, Н.В. Пановым и Р.Ф. Труниным.

3. Динамика роста исследованных давлений

Рассмотрим динамику роста давлений при исследовании сжатия железа — одного из основных конструкционных материалов (похожая картина наблюдается и для урана, и других веществ). Соответствующая диаграмма приведена на рис. 1. Конечно, прежде всего обращает на себя внимание быстрый прогресс в увеличении достигнутых давлений. Уже в 1951 г. у нас были получены давления в железе больше 10 Мбар. Измерения были проведены Л.В. Альтшулером, К.К. Крупниковым, Б.Н. Леденёвым и М.И. Бражник. Штриховые вертикальные отрезки на рис. 1 означают, что у авторов результатов на то время имелись небольшие сомнения в отношении полученной точности высоких точек. Несколько позднее положение этих точек было подтверждено на современных измерительных устройствах с улучшенными характеристиками. Таким образом эти сомнения были сняты. Отметим, что близкие параметры на железе были достигнуты в США спустя более 30 лет!

Максимальные параметры при исследовании сжимаемости железа на лабораторных установках составляют у нас 18 Мбар; ещё бóльшие значения (25 Мбар) зафиксированы при исследовании тантала [8–10].

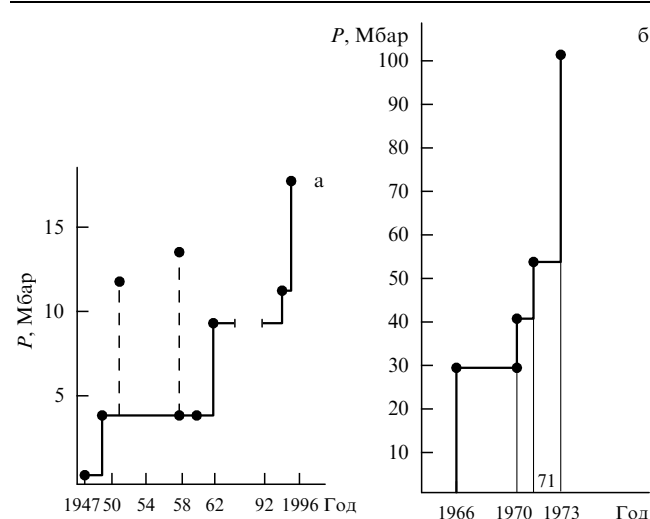


Рис. 1. Временные диаграммы роста давлений при исследовании ударно-волнового сжатия железа: (а) лабораторные исследования, (б) исследования при подземных ядерных взрывах.

Можно ли получить на сферических системах ещё более высокие давления? Да, можно. Но такие системы будут настолько дорогими, что следует хорошо подумать над целесообразностью их осуществления. Кроме того, уже достигнутые давления позволяют достаточно аккуратно выбрать теоретическую модель, пригодную для расчётов наших конструкций, в том числе, и при существенно больших давлениях, чем достигнутые в эксперименте.

На рисунке 1б демонстрируется рост давлений (также для железа) в условиях проведения полигонных ядерных взрывов.

Кратко напомним постановку этих опытов [6]. В штольне, неподалёку от испытываемого ядерного заряда, непосредственно в горной породе выполняется ровная технологическая площадка, центр которой перпендикулярен направлению на центр заряда. На площадке устанавливается измерительное устройство, которое представляет собой конструкцию, состоящую из стальной пластины-ударника и стальной мишени, расположенной на оптимальном расстоянии от пластины (с точки зрения выхода ударника на постоянную скорость полёта). Конструкция измерительного устройства предусматривает снижение ударно-волновых нагрузок на ударник и возмущений, распространяющихся перед ударником, на регистрирующую систему.

В связи с тем, что железо как эталонный материал играет важную роль в методе отражений, было проведено несколько измерений сжатия железа абсолютным методом торможения [2], в соответствии с которым в опытах одновременно измерялась скорость подлетающей стальной пластины-ударника и скорость ударной волны в мишени (сталь-3).

Измерения в трёх опытах оказались результативными. Их данные широко обсуждались в научной печати, на конференциях и т.п. (см., например, [6, 11, 12]), поэтому мы ограничимся лишь напоминанием основных результатов.

Были получены следующие параметры:

- давления в трёх образцах железа 41,3, 54,2 и 105,0 Мбар;
- плотности сжатых образцов 21,3, 23,00 и 26,5 г см⁻³ соответственно;
- скорости подлетающего ударника 36,5, 42,7 и 60,8 км с⁻¹ соответственно.

Наши коллеги из США в подобных условиях, но значительно позднее, достигли лишь давления 20 Мбар (на молибдене).

Полученные точки определили положение ударной адиабаты железа во всём диапазоне исследованных давлений, вплоть до 105 Мбар. Тем самым они открыли дорогу для проведения измерений сжатия веществ как в лабораторных условиях, так и в условиях подземных ядерных испытаний при сверхвысоких давлениях (метод отражения, экран — железо).

Эти же результаты ответили и на вопрос о выборе наиболее адекватной эксперименту теоретической модели поведения вещества в области сверхвысоких давлений.

Рисунок 2 демонстрирует кривые сжатия металлов, исследованных у нас как в лабораторных условиях, так и при подземных ядерных взрывах. Обращает на себя внимание то, что на Mo и особенно на Al лабораторные и полигонные измерения при подземных ядерных взрывах

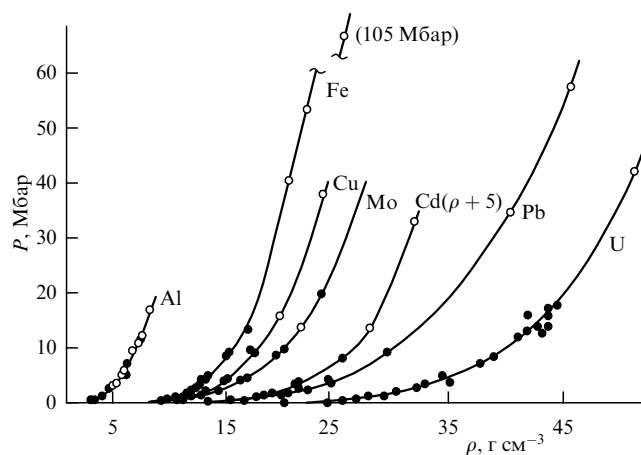


Рис. 2. Ударные адиабаты металлов, исследованных в лабораторных условиях (тёмные кружки) и при проведении подземных ядерных взрывов (светлые кружки). Надпись на рисунке "Cd ($\rho + 5$)" означает, что для удобства представления все значения плотности для соответствующей адиабаты сдвинуты по горизонтальной оси на 5 г см⁻³.

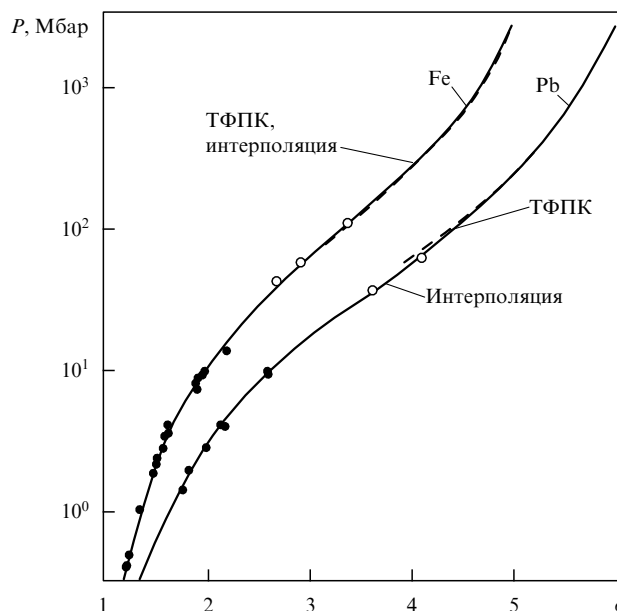


Рис. 3. Интерполяционные ударные адиабаты железа и свинца: ● — лабораторные измерения, ○ — измерения при подземных ядерных взрывах, штриховые кривые — результаты расчёта по модели ТФПК, сплошные кривые — интерполяция.

вах по давлениям взаимно перекрываются и согласуются между собой. По-видимому, и для других элементов имеется такое же согласие. Это подтверждается совпадением аналогичных данных для сложных соединений типа плексигласа, каменной соли и др. [13, 14]. Кроме того, разумная интерполяция данных, относящихся к разным давлениям, говорит о том, что и для других металлов лабораторные и полигонные измерения соответствуют друг другу.

Рассмотрим теперь, как полученные экспериментальные данные соответствуют используемой у нас теоретической зависимости. На рисунке 3 для примера приведены данные по железу и свинцу. Штриховая кривая — расчётная адиабата по модели Томаса—Ферми с учётом

взаимодействия ядер (ТФПК — аббревиатура от "модель Томаса—Ферми + поправки Калиткина и Копышева"). При давлениях порядка 100 Мбар расчётные и экспериментальные адиабаты практически совпадают, вплоть до совпадения их производных.

Примерно та же картина имеет место и для других металлов [6, 7]. Отметим вместе с тем, что другие теоретические модели значительно хуже соответствуют эксперименту [6].

Экспериментальное доказательство справедливости модели ТФПК открыло большие возможности для продвижения исследований сжимаемости различных веществ в область сверхвысоких давлений. И эти возможности были достаточно полно использованы.

В заключение отметим, что всего в нашей лаборатории было исследовано ударное сжатие более 250 веществ. В это число входят практически все металлы периодической системы, включая изотопы водорода и ряд трансурановых элементов, сплавы металлов, оксиды, гидриды и нитриды металлов, значительное число минеральных образований, большинство представителей органических соединений, жидкости и т.д. Сюда можно добавить более ста ударных адиабат поверхностных горных пород [15].

4. Сжатие пористых металлов

Перейдём теперь к рассмотрению исследований ударного сжатия пористых металлов, т.е. металлов с искусственно сниженной исходной плотностью, когда средняя плотность образца $\rho_0 = \rho_0/m$ (m — степень пористости). На необходимость исследования таких систем впервые указал Зельдович в конце сороковых годов прошлого века. Интерес к этим системам связан, прежде всего, с их значением для выбора и обоснования моделей уравнений состояния веществ, в частности тепловых составляющих этих уравнений [16]. Действительно, ударные адиабаты пористых веществ занимают на $P(\rho)$ -диаграмме основную площадь слева от адиабаты с исходной кристаллической плотностью ρ_0 . Кроме того, они характеризуются существенно более высокими температурами разогрева образцов по сравнению с температурой на адиабате вещества с исходной плотностью ρ_0 . Поэтому исследования пористых веществ фактически дают для тестирования параметров моделей широкое поле различных состояний.

Первые измерения сжимаемости пористых образцов железа относятся к концу 1940-х годов [3].

В [17] при исследовании вольфрама впервые был обнаружен парадоксальный эффект, а именно: для исходных плотностей, меньших некоторых критических ρ_{00} , приложение к образцу давлений даже в несколько мегабар не сжимает его до исходной плотности кристаллического вольфрама.

В [18] измерения проведены на четырёх металлах (железо, свинец, алюминий и медь). Существенно увеличен потолок давлений, который достиг 9 Мбар. В работе [18] впервые было предложено интерполяционное уравнение состояния, основывающееся на данных исследования ударных адиабат пористых и сплошных металлов.

Значительно более подробно общие закономерности сжатия пористых металлов и различных соединений (при широкой вариации исходных плотностей) исследованы в [19–25]. Например, только для одного никеля получено 13 (!) "пористых" адиабат.

Во всех этих исследованиях использовался метод "отражения".

При получении экспериментальных данных много внимания уделялось методическим вопросам, связанным с влиянием особенностей порошковых образцов на конечные результаты регистраций.

Изучалось влияние размера частиц, влияние воздуха и влажности образцов на параметры ударных волн. Соответствующие измерения проводились как в лабораторных, так и в полигонных опытах [26, 27]. Общий вывод на основе результатов этих исследований следующий: при разумной вариации исследуемых параметров показано отсутствие их влияния на характеристики ударных волн. Естественно, этот вывод справедлив только при существующих сегодня погрешностях эксперимента и технических возможностях регистрации. Вместе с тем данный вывод позволил считать ударно-волновые режимы при сжатии пористых образцов близкими к равновесным, что свело проведение экспериментов к стандартной постановке и значительно упростило интерпретацию результатов.

Всего в [15] исследована сжимаемость 16 металлов. Кроме никеля — это медь (9 адиабат), молибден (8); менее других металлов изучен магний (одна "пористая" адиабата). На каждой адиабате было получено по 8–12 экспериментальных точек. В качестве примера мы приведём данные по сжимаемости никеля (рис. 4). Такой же характер имеют ударные адиабаты и для других металлов.

Видно, что пористые ударные адиабаты заполняют практически всю плоскость P – ρ слева от адиабаты с $m = 1$. Наибольшая пористость (наименьшая исходная плотность) — у крайней левой адиабаты. Её начальная плотность составляет $0,32 \text{ г см}^{-3}$.

Характерные особенности адиабат следующие.

1. На каждой из адиабат имеются два участка разного наклона. Первый, пологий, участок "стелется" вдоль оси абсцисс и заканчивается при плотностях, близких к нормальной плотности металла. Давления на адиабатах этого участка практически совпадают друг с другом (в масштабе рисунка) и близки к оси абсцисс. На рисунке 4 они не приведены.

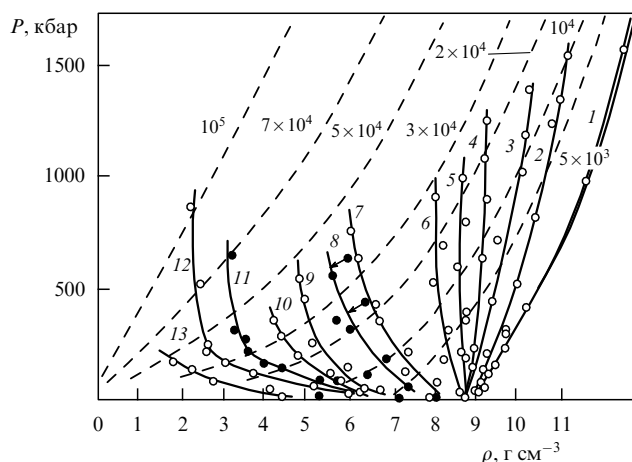


Рис. 4. P – ρ -диаграмма никеля. Лабораторные измерения. Порядковые номера адиабат (1–13) соответствуют степени пористости $m = \rho_0/\rho_{00} = 1,1, 1,41, 1,72, 2,0, 2,3, 2,7, 4,55, 5,5, 7,2, 10, 15, 20, 28$. Штриховые кривые — расчётные изотермы по [28, 29], числа у изотерм — значения температур.

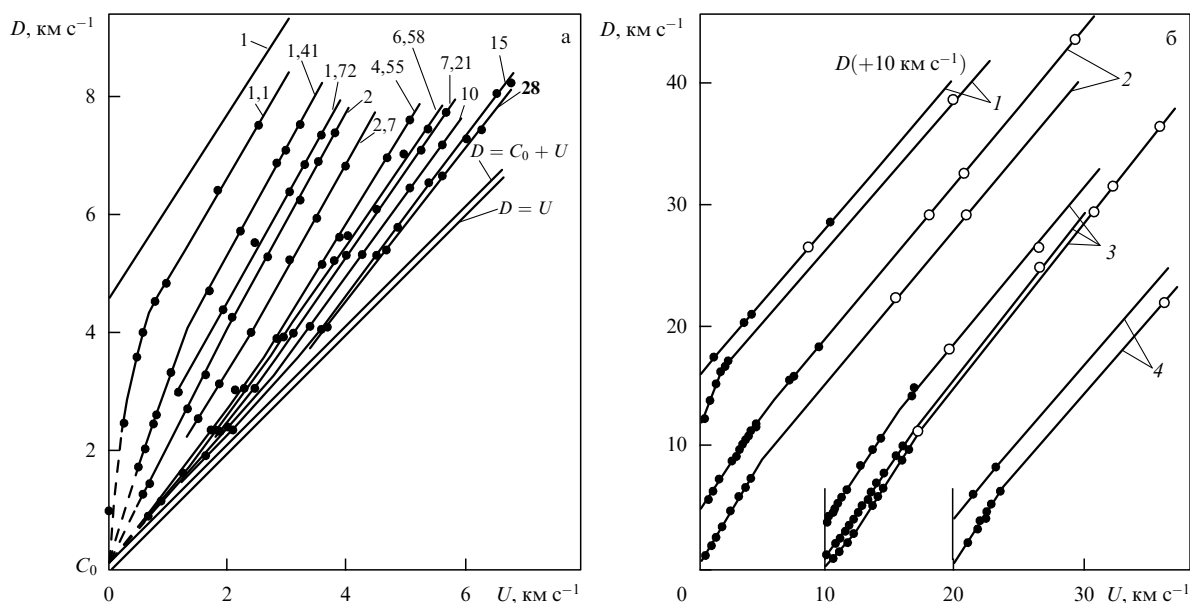


Рис. 5. (а) $D-U$ -диаграмма никеля. Лабораторные измерения. Числами у адиабат обозначены соответствующие значения пористости. (б) $D-U$ -диаграммы "сплошных" и "пористых" металлов: 1 — молибден ($m = 1,0, 1,23$), 2 — железо ($m = 1,0, 3,3$), 3 — медь ($m = 1,0, 3,1, 4,0$), 4 — вольфрам ($m = 1,0, 3,1$); ● — лабораторные данные, ○ — измерения при подземных взрывах. (Для наглядности все скорости ударной адиабаты Мо (адиабата 1) сдвинуты вверх по оси на 10 км с⁻¹.)

Второй участок начинается с резкой смены (с изменением знака производной $dP/d\rho$) наклона адиабаты. Давление, при котором это происходит, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков кбар. Это так называемое "давление упаковки" — та минимальная величина, при которой в эксперименте достигается плотность сжатого вещества, наиболее близкая к нормальной плотности. Каждой пористости отвечает своё значение "давлений упаковки".

2. Вторые участки — крутые, малосжимаемые ветви, характеризующиеся различными наклонами: при $m < 2$ наклон $dP/d\rho > 0$, в интервале $2 < m < 3$ $dP/d\rho \sim \infty$ и, наконец, при $m > 3$ наклон $dP/d\rho < 0$.

Максимальная температура, рассчитанная по УРС [28, 29], соответствует пористой адиабате никеля с исходной плотностью $0,45 \text{ г см}^{-3}$ и составляет 110 тысяч градусов при давлении 0,9 Мбар. Для сравнения, на "сплошной" адиабате та же температура достигается при давлении около 16 Мбар.

Наконец, нельзя не рассмотреть хотя бы два рисунка ударных адиабат в первичных координатах, т.е. тех, в которых получаются экспериментальные данные.

На рисунке 5а приведены те же данные по никелю. Видно, что адиабаты пористых образцов занимают плоскость между адиабатой "сплошного" вещества ($m = 1$) и прямой $D = C_0 + U$, смещённой относительно биссектрисы $D = U$ на величину C_0 ($C_0 \geq 0,1 \text{ км с}^{-1}$ — минимальная величина D из всех значений, полученных при экстраполяции к оси ординат пористых ударных адиабат).

Эта прямая ограничивает в $D-U$ -плоскости проведение исследований кинематических параметров зоной, расположенной слева от нее: "заходить" за прямую вправо запрещают законы сохранения. Со стороны малых m естественным ограничением является положение адиабаты с $m = 1$. Подобные ситуации имеют место и для других металлов.

Из рисунка 5 видно, что мы практически подошли к ограничительной прямой и дальнейшее увеличение пористости, т.е. получение адиабат при ещё меньших исходных плотностях, чем $0,32 \text{ г см}^{-3}$, вряд ли целесообразно. Обращает на себя внимание характерный вид пористых адиабат, исходящих из окрестности единой начальной точки и "подстраивающихся" под ход адиабаты с нормальной плотностью.

Наконец, на рис. 5б в тех же координатах приведены лабораторные и полученные при подземных ядерных испытаниях данные. Что здесь примечательного? При некоторых скоростях ударные адиабаты, отвечающие разным m , становятся прямыми, примерно параллельными друг другу, с близким общим наклоном $dD/dU \approx 1,2$, что свидетельствует о выравнивании их динамических свойств. Кстати, и сами адиабаты, и их наклон при этих условиях соответствуют расчётным параметрам, полученным по модели ТФПК.

5. Сжатие изотопов водорода

В заключение приведём полученные у нас в последние годы результаты исследования ударного сжатия изотопов водорода — протия и дейтерия. Одна из целей этих исследований — проверка результатов, полученных американскими исследователями из Ливерморской национальной лаборатории, которые при давлениях, больших 400 кбар, с использованием лазерной установки Nova обнаружили аномальное увеличение сжатия жидкого дейтерия, при котором его плотность увеличивалась от $0,6 \text{ г см}^{-3}$ до $\approx 0,9 \text{ г см}^{-3}$ [30, 31]. По своему характеру адиабата (рис. 6) при этих давлениях напоминала зависимость, соответствующую фазовому переходу первого рода с большим скачком плотности.

Эти данные вызвали немалые сомнения как у нас в стране, так и за рубежом. Поэтому было решено проверить американские результаты на взрывных установках нашего института в сопоставимой области давлений.

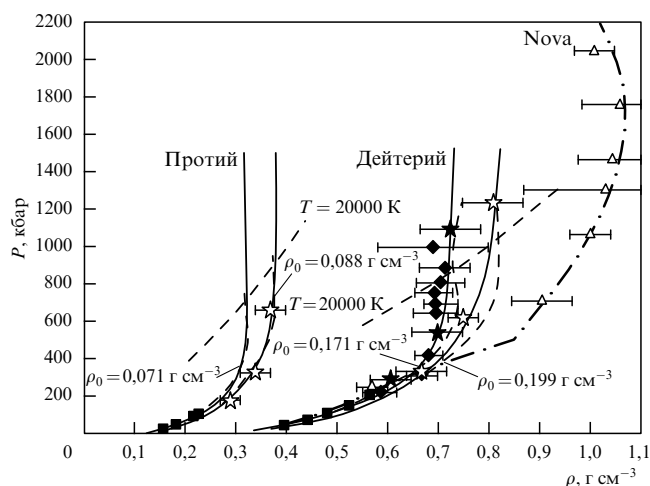


Рис. 6. Ударные адиабаты изотопов водорода: ■ — измерения при низких давлениях (американские данные), ◆ — данные [32, 33], △ — данные [30, 31], ★, ☆ — измерения ВНИИЭФ (соответственно жидкое и твёрдое исходные состояния).

Для большей убедительности измерения проводились не только на дейтерии (исходно жидкая и твёрдая фазы), но и на протии (твёрдая фаза). Одновременно с нами проверку результатов своих коллег провели и сотрудники Сандийской национальной лаборатории (на жидком дейтерии) [32, 33].

Конечно, целью наших исследований была не только проверка американских данных, но и получение, и это главное, тестовых данных, необходимых для определения параметров уравнений состояния изотопов водорода.

На рисунке 6 полученные данные приведены в P – ρ координатах. Видно противоречие между данными, полученными в Ливерморе на установке Nova, и нашими данными, а также результатами в Сандийской лаборатории. Взаимные погрешности аппроксимирующих кривых, обусловленные совокупной неточностью наших данных и данных Сандийской лаборатории, не имеют общего перекрытия с результатами, полученными на Nova.

Это и является формальным доказательством ошибочности результатов Nova. По существу, внутренняя согласованность результатов [34–36], полученных по методике, многократно проверенной на нескольких сотнях независимых экспериментов (опыты на газовых пушках и взрывные системы с ВВ), уже сама указывает на ошибку результатов Nova.

Мы получили, помимо выяснения вопроса о скачкообразном изменении плотности жидкого дейтерия, данные по ударному сжатию исходно твёрдых фаз дейтерия и протия. В литературе нет публикаций на эту тему.

Отметим, что проверить результаты ливерморских исследователей предложил В.Е. Фортов, а сама работа выполнена при активной поддержке Р.И. Ильяева.

6. Заключение

В этом кратком сообщении мы совсем не коснулись результатов измерений других свойств веществ: энтропического и двукратного сжатия, скоростей звука, исследований фазовых превращений и т.п. Желая ознакомиться с этими исследованиями по многочисленным публикациям в научных журналах.

И несколько слов об уравнениях состояния. Попытки получить уравнения состояния металлов в широкой области изменения термодинамических параметров без привлечения экспериментальных данных в области состояний, о которых идёт речь, предпринимались неоднократно как у нас в стране, так и за рубежом. Предпринимаются и до сих пор. Кстати, одна из первых попыток была сделана именно во ВНИИЭФ (Гандельман). Однако ни одна из этих попыток не оказалась удачной с точки зрения требований, предъявляемых у нас к этим уравнениям. Можно сказать, что для прикладных задач, стоящих перед ВНИИЭФ (и не только перед ним), преимущество у нас было отдано не априорным, а полумпирическим моделям.

Таких моделей существует несколько. Наибольшее распространение у нас получили варианты так называемых уравнений с тепловыми решётчными и электронными членами. Эти уравнения основываются, как правило, на твердотельных представлениях, хотя некоторые варианты учитывают и свойства жидкостей. Одним из недостатков указанных моделей являлось то, что они не учитывают испарение жидкости.

Этого недостатка лишён другой тип уравнений — модифицированная модель Ван-дер-Ваальса, применимость которой распространена на область повышенных сжатий жидкости. Модель учитывает различие в свойствах твёрдого тела и жидкости, а также испарение жидкости и ионизацию. По широте описания свойств металлов в различных состояниях фазовой диаграммы уравнение модифицированной модели Ван-дер-Ваальса обладает рядом преимуществ перед уравнениями других моделей.

Вообще, уравнения состояния — это, конечно, отдельная большая тема, которая требует специального рассмотрения. В связи с этим я с удовольствием рекомендую читателям обратиться к недавно выпущенной из печати книге В.П. Копышева [37].

И, наконец, нельзя не напомнить первопроходцев и тех, чьи заслуги в становлении и развитии физики высоких плотностей энергии были определяющими.

Прежде всего, это Л.В. Альтшулер, Е.И. Забабахин, Я.Б. Зельдович, С.Б. Кормер, К.К. Крупников, Ю.Б. Харитон — организаторы и руководители исследований, проводимых по этой тематике в Ядерном центре Советского Союза.

Их ближайшие коллеги и руководители отдельных направлений исследований во ВНИИЭФ — это А.А. Баканова, М.И. Бражник, Ф.В. Григорьев, Н.А. Дмитриев, М.В. Жерноклётов, В.Н. Зубарев, А.Г. Иванов, В.П. Копышев, Б.Н. Леденёв, А.Б. Медведев, В.Н. Минеев, С.А. Новиков, М.Н. Павловский, М.А. и А.М. Подурцы, Г.В. Симаков, М.В. Сеницин, В.Д. Урлин, А.И. Фунтиков, К.Б. Юшко и многие другие.

В этом кратком сообщении рассказано лишь о *небольшой доле* результатов, полученных в нашей лаборатории ВНИИЭФ. Вместе с тем много интересных и важных исследований проведено и во втором Российском ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики (Е.Н. Аврорин), в московских институтах (В.Е. Фортов), Сибирском отделении РАН (В.М. Титов) и некоторых других организациях.

Но сегодня не им, а нам — 65 лет.

Список литературы

1. Альтшулер Л В *УФН* **85** 197 (1965) [Al'tshuler L V *Sov. Phys. Usp.* **8** 52 (1965)]
2. Альтшулер Л В, Крупников К К, Бражник М И *ЖЭТФ* **34** 886 (1958) [Al'tshuler L V, Krupnikov K K, Brazhnik M I *Sov. Phys. JETP* **7** 614 (1958)]
3. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **34** 874 (1958) [Al'tshuler L V *Sov. Phys. JETP* **7** 606 (1958)]
4. Альтшулер Л В и др. *ФТТ* **5** 279 (1963)
5. Альтшулер Л В и др. *УФН* **166** 575 (1996) [Al'tshuler L V *Phys. Usp.* **39** 539 (1996)]
6. Трунин Р Ф *УФН* **164** 1215 (1994) [Trunin R F *Phys. Usp.* **37** 1123 (1994)]
7. Трунин Р Ф, в сб. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества* (Под ред. В Е Фортгова и др.) (М.: Наука, 2000) с. 76
8. Трунин Р Ф *УФН* **171** 387 (2001) [Trunin R F *Phys. Usp.* **44** 371 (2001)]
9. Трунин Р Ф, Панов Н В, Медведев А Б *Хим. физ.* **14** (2–3) 97 (1995)
10. Трунин Р Ф, Панов Н В, Медведев А Б *Письма в ЖЭТФ* **62** 572 (1995) [Trunin R F, Panov N V, Medvedev A B *JETP Lett.* **62** 591 (1995)]
11. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **102** 1433 (1992) [Trunin R F *JETP* **75** 777 (1992)]
12. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **103** 2189 (1993) [Trunin R F *JETP* **76** 1095 (1993)]
13. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **108** 851 (1995) [Trunin R F *JETP* **81** 464 (1995)]
14. Трунин Р Ф *TBT* **35** 901 (1997) [Trunin R F *High Temp.* **35** 888 (1997)]
15. Трунин Р Ф и др., в сб. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ* (Под ред. Р Ф Трунина) (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
16. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **32** 1577 (1957) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **5** 1287 (1957)]
17. Крупников К К, Бражник М И, Крупникова В П *ЖЭТФ* **42** 675 (1962) [Krupnikov K K, Brazhnik M I, Krupnikova V P *Sov. Phys. JETP* **15** 470 (1962)]
18. Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **42** 686 (1962) [Kormer S B et al. *Sov. Phys. JETP* **15** 477 (1962)]
19. Трунин Р Ф, Симаков Г В, в сб. *ЖЭТФ* **103** 2180 (1993) [Trunin R F, Simakov G V *JETP* **76** 1090 (1993)]
20. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **96** 1024 (1989) [Trunin R F et al. *JETP* **69** 580 (1989)]
21. Трунин Р Ф, Симаков Г В, Панов Н В *TBT* **39** 430 (2001) [Trunin R F, Simakov G V, Panov N V *High Temp.* **39** 401 (2001)]
22. Симаков Г В, Трунин Р Ф *Изв. АН СССР. Физ. Земли* (11) 72 (1991)
23. Трунин Р Ф и др. *TBT* **37** 732 (1999) [Trunin R F et al. *High Temp.* **37** 702 (1999)]
24. Трунин Р Ф, Панов Н В *TBT* **38** 754 (2000) [Trunin R F, Panov N V *High Temp.* **38** 728 (2000)]
25. Трунин Р Ф, Симаков Г В, в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* (Под ред. Р И Ильяева) (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2003) с. 234
26. Зубарев В Н и др., в сб. *Докл. I-go Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям* Т. 1 (М.: ВНИИФТРИ, 1974) с. 61
27. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **95** 631 (1989) [Trunin R F *Sov. Phys. JETP* **68** 356 (1989)]
28. Медведев А Б *Вопр. атом. науки и тех. Теор. и прикл. физ.* (1) 23 (1990)
29. Медведев А Б *Вопр. атом. науки и тех. Теор. и прикл. физ.* (1) 12 (1992)
30. Da Silva L B et al. *Phys. Rev. Lett.* **78** 483 (1997)
31. Collins G W et al. *Phys. Plasmas* **5** 1864 (1998)
32. Knudson M D et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 225501 (2001)
33. Knudson M D et al. *Phys. Rev. B* **69** 144209 (2004)
34. Boriskov G V et al. *Phys. Rev. B* **71** 092104 (2005)
35. Трунин Р Ф и др. *ЖТФ* **76** (7) 90 (2006) [Trunin R F et al. *Tech. Phys.* **51** 907 (2006)]
36. Трунин Р Ф, Урлин В Д, Медведев А Б *УФН* **180** 605 (2010) [Trunin R F, Urlin V D, Medvedev A B *Phys. Usp.* **53** 577 (2010)]
37. Копышев В П *Теория уравнений состояния* (Саров: ФГУП "РФЯЦ–ВНИИЭФ", 2009)

PACS numbers: 84.30.Ng, **84.70. + p**, **85.70. – w**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104k.0422

Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах

Б.Е. Гриневич, В.А. Демидов,
А.В. Ивановский, В.Д. Селемир

1. Введение

Поиски источников энергии, которые по энергозапасу приближались бы к взрывчатым веществам (ВВ), неизбежно приводят к мысли об использовании электрического или магнитного полей. Однако запас удельной энергии в диэлектриках ($\epsilon_0 \epsilon E^2/2$) и магнетиках ($\mu_0 \mu H^2/2$) обычно невелик — порядка 100 Дж л^{-1} .

В результате оказывается, что создание конденсаторных батарей, способных аккумулировать энергию в диапазоне нескольких десятков мегаджоулей, — задача весьма сложная и дорогостоящая. Для ВВ удельная энергия составляет $\rho D^2/16 \approx 10 \text{ МДж л}^{-1}$ (где ρ — плотность ВВ, D — скорость волны детонации). Можно попытаться перевести эту энергию в энергию магнитного поля, одновременно увеличивая концентрацию энергии. Впервые эту идею высказал А.Д. Сахаров [1] в 1951 г. Он указал, что при сохранении магнитного потока путём быстрого уменьшения индуктивности контура с током, сближая с помощью взрыва прямой и обратный проводники, энергию ВВ можно преобразовать в энергию магнитного поля, причём тем эффективнее, чем больше энергия поля по сравнению с джоулевым теплом.

А.Д. Сахаровым предложены два типа генераторов, реализующих магнитную кумуляцию: генераторы поля и генераторы энергии [2]. Существует два основных ограничения, накладываемых на скорость сжатия магнитного потока. Во-первых, сжатие должно быть достаточно быстрым, для того чтобы выполнялось условие $dL/dt \gg R$ и нагрузка не повреждалась действием пондеромоторных сил. Во-вторых, поскольку при быстром изменении потока Φ появляется высокое электрическое напряжение $U = -L dI/dt$, требуется обеспечить достаточно прочную электрическую изоляцию, предохраняющую от электрических пробоев. Для эффективной работы генератора необходимо поддерживать напряжение постоянным на максимально допустимом уровне. При отсутствии потерь потока это может быть достигнуто при экспоненциальном законе вывода индуктивности.

2. Принцип работы и основные характеристики дискового взрывомагнитного генератора

На рисунке 1 схематически изображён дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ). Когда магнитный поток в генераторе достигает заданной величины, контур генератора замыкается, захватывая таким образом введённый магнитный поток. В тот же момент с помощью

Б.Е. Гриневич, В.А. Демидов, А.В. Ивановский, В.Д. Селемир.
ФГУП "Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ
E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru