

ОБОЗРЕНИЕ

Прогресс современного естествознания характеризуется быстрым расширением информации об экстремальных состояниях материи. В этой области физики и техники большое развитие получили динамические методы, основанные на генерации и измерении высокоплотных и высокотемпературных состояний в мегабарном диапазоне давлений, возникающих на короткие промежутки времени за фронтами сильных ударных волн. В данной статье рассматривается история возникновения и развития этого научного направления, сыгравшего большую роль в создании ядерного щита нашей страны и заложившего основы современного понимания физики экстремальных состояний материи. В числе авторов статьи - недавно ушедший из жизни доктор физико-математических наук профессор Лев Владимирович Альтшулер (1913-2003). В 1934 г. он поступил на физический факультет МГУ, участник Великой Отечественной войны, в 1946 г. вместе с В.А. Цукерманом получил Государственную премию за разработку методов импульсивной рентгенографии, которая помогла выяснить принципы действия кумулятивных фауст-патронов. По приглашению академика Ю.Б. Харитона участвовал в атомном проекте. С 1946 г. по 1969 г. работал во Всесоюзном научно-исследовательском институте экспериментальной физики (г. Саров), где руководил отделом. Затем был заведующим лабораторией Всесоюзного института оптико-физических измерений, а с 1989 г. работал в Институте теплофизики экстремальных состояний РАН. Л.В. Альтшулер - основоположник динамической физики высоких давлений. В 1949 г. и 1953 г. ему были присуждены Государственные премии, в 1962 г. - Ленинская премия, а в 1999 г. - премия Правительства России. В 1991 г. он получил премию Американского физического общества "За плодотворный вклад в развитие исследований материи при ударно-волновом сжатии". "Он был ярким, предельно честным, принципиальным и доброжелательным человеком, много работавшим до последнего своего часа..." - отмечали в некрологе его коллеги.

НАЧАЛО ФИЗИКИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, В. Е. Фортов, А. И. Фунтиков

Применение ударных волн позволило изучить состояния многих элементов и химических соединений в очень широких диапазонах давлений и температур, найти высокотемпературные кривые плавления и кипения, получить сильно неидеальную плазму, обнаружить неизвестные ранее электронные перестройки в металлах, индуцированные ударными волнами фазовые и химические превращения, исследовать кинетику элементарных процессов и фазовых трансформаций, а также получить новую информацию о механических свойствах твердых тел и жидкостей.

ПЕРВЫЕ ШАГИ

Становление динамических методов неотделимо от хронологии создания атомного оружия, по-

скольку от степени сжатия делящегося материала зависит, "сработает" ли атомная бомба, и ее мощность. А степень сжатия прямо определяется уравнением состояния делящихся материалов (ДМ), давлением детонации взрывчатых веществ (ВВ), сжимающих ДМ, что определяет и конструкцию бомбы.

Для определения этих физических характеристик и параметров в США в рамках Манхэттенского проекта опыты с ударными волнами были начаты в 1945 г. В Советском Союзе такие исследования были начаты в Российском федеральном ядерном центре - Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Арзамас-16, г. Саров) - с 1947 г. (в то время этот центр был подразделением Академии наук и назывался Конструкторское бюро № 11 Лаборатории № 2 АН СССР), затем с 1955 г. - во вновь организованном Всесоюзном научно-исследовательском институте технической физики (ВНИИТФ, Челябинск-70, г. Снежинск). В Академии наук работы по детонации конденсированных ВВ и мощным ударным волнам были начаты в Институте химической физики под руководством академика Н.Н. Семенова, а затем получили свое развитие в Институте проблем химической физики РАН, Институте гидродинами-

КРУПНИКОВ Константин Константинович - кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Российского федерального ядерного центра ВНИИ технической физики, г. Снежинск. ФОРТОВ Владимир Евгеньевич - академик. ФУНТИКОВ Александр Иосифович - доктор технических наук, заведующий лабораторией Института термофизики экстремальных состояний РАН.



В.Л. Гинзбург, Л.В. Альтшулер и В.А. Цукерман
(г. Саров), 1955

ки СО, Институте теплофизики экстремальных состояний РАН.

Во ВНИИЭФ научным руководителем с момента образования института и до 1996 г. был академик Ю.Б. Харитон, создавший максимально благоприятные возможности для научной работы содружества физиков, математиков, конструкторов. Экспериментальные исследования в институте проводились в тесном контакте с выдающимися советскими учеными-теоретиками, многие из которых стали потом членами Академии наук, - Я.Б. Зельдовичем, А.Д. Сахаровым, И.Е. Таммом, Д.А. Франк-Каменецким, Е.И. Забахиным - лидерами новой научной дисциплины - физики высоких плотностей энергий [1]. В конце 1960 г. Е.И. Забахин стал научным руководителем ВНИИТФ.

Одним из ведущих исследовательских центров был также Институт химической физики РАН, где по инициативе нобелевского лауреата академика Н.Н. Семенова - друга и коллеги академика Ю.Б. Харитона - были развернуты работы по изучению горения и детонации и где начал свою блестящую научную карьеру Я.Б. Зельдович. Работы велись в тесном содружестве и с другими академическими институтами, в которых выполнялись отдельные частные исследования по проекту.

Некоторые важнейшие исследования, способствовавшие успеху советских атомных разработок, начались значительно раньше - в 30-е годы и во время войны: серия статей Я.Б. Зельдовича и Ю.Б. Харитона 1939-1940 гг. по теории цепного деления урана - как стационарного в энергетических установках, так и взрывного деления; создание Президиумом Академии наук СССР в июле 1940 г. Урановой комиссии, в которую вошли И.В. Курчатов и Ю.Б. Харитон. 28 сентября 1942 г.

И.В. Сталин подписывает распоряжение: "Обязать Академию наук СССР (акад. Иоффе) возобновить работы по исследованию возможности создания урановой бомбы. С этой целью организовать при Академии наук специальную лабораторию атомного ядра...". Заведующим этой, созданной еще в эвакуации в Казани лабораторией был назначен И.В. Курчатов, ставший потом руководителем всего атомного проекта СССР. Позже Постановлением ГКО от 11 февраля 1943 г. лаборатория была переведена в Москву и превращена в Лабораторию № 2 Академии наук, положившую начало будущему Институту атомной энергии им. И.В. Курчатова. Как пишет в своих воспоминаниях академик А.П. Александров, "Курчатов привлек огромные научные силы - академические институты, институты авиационной, металлургической, химической промышленности и многих других организаций", и далее: "Круг привлеченных Курчатовым специалистов все расширялся: академики В.Г. Хлопин, А.П. Виноградов, А.А. Бочвар, Н.Н. Семенов, С.А. Векшинский и множество других с крупными коллективами вели разные разделы работ" [2, 3].

Никак в те годы не связанные с атомной программой, но ставшие впоследствии очень важными для ее успешной реализации и в целом для развития в нашей стране физики мегабарных давлений исследования проводились в Институте машиноведения АН СССР, где в лаборатории импульсной рентгенографии, руководителем которой был В.А. Цукерман, работал и Л.В. Альтшулер. Следует подчеркнуть, что динамические исследования веществ с применением ударных волн требуют использования методик регистрации быстропротекающих процессов взрыва и детонации. В Арзамасе-16 этим, в частности, занимался отдел импульсного рентгенографирования В.А. Цукермана. Фактически разработка методов импульсного рентгенографирования началась гораздо раньше - в начале 30-х в рентгеновской лаборатории Московского вечернего машиностроительного института, которой руководил профессор Е.Ф. Бахметев (репрессированный в 1935 г. и в 1943 г. погибший в ссылке в Казахстане) и в которой наряду с В.А. Цукерманом и Л.В. Альтшулером работал будущий академик и нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург, так много впоследствии сделавший для создания отечественной термоядерной бомбы ("вторая идея", по классификации А.Д. Сахарова). В 1940 г. по просьбе директора Института машиноведения АН СССР академика Е.А. Чудакова лаборатория была переведена в этот институт. В марте 1941 г. в лаборатории была получена первая в Советском Союзе рентгенограмма малокалиберной пули в свободном полете; в 1942 г. Ю.Б. Харитон рекомендовал лаборатории разработать технику съемок явлений при взрыве; в лаборатории была раскрыта тайна

"прожигающей способности" немецких фауст-патронов, что имело важное оборонное значение, оказавшее помощь войскам действующей армии. В январе 1946 г. В.А. Цукерман и Л.В. Альтшулер получили Государственную премию за разработку методов импульсной рентгенографии явлений при выстреле и взрыве, среди поздравлений была и телеграмма за подписью И.В. Курчатова. Тогда же Ю.Б. Харитон предложил им включиться в разработку советского атомного оружия. "Для завершения разработки понадобятся опыты, которые трудно будет провести в условиях Москвы", - сказал Юлий Борисович [4].

ДЕТОНАЦИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Во ВНИИЭФ в 1947 г. для Я.Б. Зельдовича и руководителей экспериментальных коллективов - В.А. Цукермана, Е.К. Завойского, Л.В. Альтшулера первоочередной задачей стало определение давлений детонации конденсированных взрывчатых веществ. Проблема была в том, что прогнозируемые по различным теоретическим моделям и существенно определяющие мощность проектируемых атомных зарядов значения давления продуктов взрыва в сходящихся детонационных волнах различались более чем в полтора раза. В сжатые сроки исследовательским коллективом ВНИИЭФ были получены экспериментально обоснованные данные, позволившие разрешить эти противоречия, что открыло дорогу к успешному испытанию 1949 г. и позволило предсказать его результаты.

Еще в конце XIX в. профессор Московского сельскохозяйственного института (теперь сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева) В.А. Михельсон обратил внимание на поразившее его сохранение амплитуды детонационной волны в процессе ее распространения по заряду. Дальнейшими вехами в теории детонационных процессов являлись труды О. Чепмена (1899), Е. Жуге (1917), а также Я.Б. Зельдовича (1940), предложившего одновременно с Нейманом и Дьюрингом современное описание детонационных процессов (модель ЗНД).

Основным отличием детонационной волны от ударной является постоянство скорости ее распространения. Скорость распространения детонационных волн является минимально возможной, а состояния за их фронтами, по условию Жуге, обладают тем замечательным свойством, что скорость звука в продуктах сгорания в точности равна скорости стационарной детонации относительно этих продуктов.

Структура фронта детонационного превращения образована фронтом ударного сжатия исходного ВВ, стационарной зоной химического разложения и примыкающей к химической зоне, нахо-

дящейся в области расширяющихся продуктов взрыва. Расчетные амплитуды детонационных волн на границе этой зоны, отвечающие давлениям детонации, зависят от уравнений состояния продуктов взрыва.

В середине 40-х гг. традиционными были уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, в которых основной расчетный параметр (коволум), в общем случае зависящий от давления, представлял "собственный объем" продуктов детонации. Согласно другой концепции, развитой Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем в 1945 г., уравнения состояния продуктов взрыва были предложены в форме, применимой для жидкости с адиабатическим законом расширения из состояния Жуге. По оценкам немецкого исследователя А. Шмидта, использовавшего коволюмное уравнение состояния, давление детонации тротила получалось равным 120 кбар, а по Ландау-Станюковичу - 190 кбар. Это противоречие разработчикам конструкции бомбы необходимо было устранить, что требовало постановки соответствующих экспериментов, о чем впервые было рассказано в опубликованной значительно позже, в 1955 г., работе Я.Б. Зельдовича и А.С. Компанейца.

Экспериментальные исследования в США по этому вопросу были начаты в 1945 г., но результаты впервые опубликованы в научной периодике только в середине 50-х годов. Экспериментаторами ВНИИЭФ в 1948 г. независимо были предложены и разработаны три метода регистрации массовой скорости продуктов взрыва и давлений детонации:

- импульсное рентгенографирование смещений непрозрачных для рентгеновских лучей тонких свинцовых фольг за фронтом детонационной волны (В.А. Цукерман, В.В. Софьина);
- метод преград ("откола"), в котором осуществляется отражение детонационной волны от разной толщины пластин из различных материалов, при этом измерялась начальная скорость движения пластины или скорость ударной волны в ней (Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников);
- магнитоэлектрическая регистрация скорости продуктов взрыва за фронтом детонационной волны по скорости движения в однородном магнитном поле вложенного в заряд проводника (Е.К. Завойский, В.А. Цукерман, А.А. Бриш, М.С. Тарасов).

Все три метода прошли сложные и драматические стадии разработок, но в итоге показали справедливость концепции Ландау-Станюковича. Впоследствии эти методы были развиты, усовершенствованы и дополнены. Так, В.Н. Зубарев выполнил эксперименты по определению скорости продуктов взрыва импульсным рентгеновским методом, что позволило оценить асимптотические параметры детонации гетерогенного ВВ, используемого в первом атомном испытании 1949 г.

По инициативе Я.Б. Зельдовича в начале 60-х годов во ВНИИЭФ началось экспериментальное выяснение природы высоких давлений продуктов взрыва: в какой мере они определяются тепловым движением молекул и в какой - их упругой деформацией. С этой целью В.Н. Зубаревым и Г.С. Телегиным по уравнениям состояния основных компонентов разложения взрывчатых веществ были построены аддитивные уравнения состояния продуктов взрыва. Для этого были измерены ударные адиабаты углекислоты и азота и использованы уже известные адиабаты воды и графита. В результате было установлено, что до 65% давление детонации является тепловым. Откровением для теоретиков ВНИИЭФ явилось открытие А.А. Бришем, М.С. Тарасовым и В.А. Цукерманом большой электропроводности продуктов взрыва в слое, примыкающем к фронту детонационной волны.

В своей совокупности пионерские работы, выполненные во ВНИИЭФ в 40-50-е годы, определили фундаментальные характеристики детонации конденсированных ВВ. В последующее пятидесятилетие классическая наука о детонации была существенно развита трудами ученых академических и прикладных институтов, в первую очередь Института химической физики РАН.

УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ, СКОРОСТЬ ЗВУКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ В МЕТАЛЛАХ

В 1947 г. перед экспериментаторами ВНИИЭФ встала фундаментальная проблема: исследовать уравнения состояния ядерных ДМ - изотопа урана и плутония - и определить их ударную сжимаемость при мегабарных давлениях. Существовавшая в то время неопределенность в уравнениях состояния ДМ, так же, как и неоднозначность в давлении детонации, не позволяли предсказать мощность предстоящего первого испытания атомного оружия и рассчитать эффективность других вариантов атомных зарядов. Для решения этой сугубо практической задачи пришлось создавать основы, в сущности, новой научной дисциплины - исследование свойств веществ при сверхвысоких давлениях. В короткие сроки были предложены и разработаны методы определения ударно-волновых характеристик сжатых веществ и соответствующие измерительные высокоскоростные устройства, основанные на использовании энергии ВВ.

Инструментом, позволившим осуществить проникновение в физику высоких и сверхвысоких давлений, как указывалось выше, являются ударные волны. Стационарная ударная волна, имеющая постоянную амплитуду, характеризуется скоростью ее распространения по изучаемому объекту и массовой скоростью ударно-сжатого вещества

за ее фронтом. Измерением этих двух кинематических параметров определяются удельные энергии, давления, плотности и, при физически обоснованной теплоемкости, - температуры и энтропии ударно-сжатой среды, что, в свою очередь, позволяет построить функциональные зависимости давлений, плотностей, энергий и температур - то есть уравнения состояния исследуемых веществ [5].

Оригинальные методы были созданы экспериментаторами ВНИИЭФ при деятельном участии теоретиков для определения давления детонации веществ, в которых ударное сжатие вызывает выделение энергии; эти взрывчатые вещества использовались в атомной бомбе для сжатия делящихся материалов.

Скорость распространения ударной волны определяется путем замыкания контактов, расположенных в исследуемом образце на заданных расстояниях. В отличие от сравнительно простого измерения скорости фронта ударной волны, главной трудностью для экспериментаторов явилось определение второго кинематического параметра - скорости вещества за фронтом волны. С этой целью были созданы специальные методы исследования. Экспериментаторами ВНИИЭФ, при деятельном участии теоретиков, были определены давления детонации взрывчатых веществ и параметры сжатия ДМ, использовавшихся в атомной бомбе. Исследования были чрезвычайно актуальны как в связи с подготовкой первого советского ядерного взрыва 1949 г., так и для успеха дальнейших испытаний.

Разработка динамических методов исследования сжимаемости проводилась в Лос-Аламосской национальной лаборатории США Р. Горансоном с сотрудниками, Д. Уолшем и Р. Христианом, а также М. Мэллори и, независимо, в СССР была начата во ВНИИЭФ Л.В. Альтшулером с сотрудниками. Первоначально как в США, так и в СССР применялся уже упомянутый метод откола, основанный на измерении скорости свободной поверхности исследуемого образца после отражения от нее ударной волны. Эта скорость складывается из искомой массовой скорости вещества за фронтом ударной волны и скорости, полученной при расширении. Для ударных волн относительно небольшой интенсивности массовая скорость за фронтом ударной волны с хорошим приближением равна половине скорости откола. В мегабарном диапазоне давлений метод откола становится несостоятельным.

Вместо него в конце 40-х годов во ВНИИЭФ Л.В. Альтшулером был предложен, а К.К. Крупниковым, Б.Н. Леденевым и В.И. Жучихиным разработан принципиально иной способ определения массовой скорости в образце - метод торможения, основанный на измерении скорости ударяющего тела, создающего в образце ударную

волну [5, 6]. Если ударник сделан из того же материала, что и образец, то массовая скорость частиц сжатого образца за фронтом идущей по нему ударной волны в неограниченном диапазоне давлений точно равна половине измеренной скорости ударяющего тела. При соударении различных материалов указанное соотношение скоростей не выполняется. Это затруднение преодолевается, если в качестве ударника используются материалы с предварительно определенными динамическими адиабатами. Такими эталонными материалами были железо и алюминий.

Универсальным способом исследования динамической сжимаемости веществ стал также "метод отражения", разработанный Л.В. Альтшулером и К. К. Крупниковым совместно с Г.М. Гандельманом. Эксперименты по методу отражения включают вещество-эталон, слоем которого экранируется исследуемый образец. Прохождение волны из экрана с известным уравнением состояния в образец через границу двух сред сопровождается образованием двух волн - прямой в образце и отраженной в экране. Давления и массовые скорости за фронтами ударных волн в экране и в образце одинаковы. Поэтому в экспериментах измеряются лишь скорости ударных волн: в экране (до отражения от границы с образцом) и в образце. Эти величины доставляют всю необходимую информацию об ударном сжатии образца. Метод отражения нашел широкое применение, так как не требует непосредственного измерения массовых скоростей, был прост в реализации и позволил исследовать одновременно несколько материалов в одном и том же опыте. Таким способом проводилось большинство динамических измерений инертных материалов: металлов, диэлектриков и горных пород. В качестве "веществ-стандартов" здесь тоже чаще всего использовались железо или алюминий, которые при различных условиях опытов располагались до или после исследуемого образца. В дальнейшем идеология этого метода была использована Л.В. Альтшулером, В.Е. Фортовым и М.В. Жерноклетовым для изучения неидеальной плазмы окологривических состояний металлов при адиабатическом расширении металлов, предварительно сжатых и необратимо разогретых мощными ударными волнами [7].

Метод откола в советских исследованиях применялся, как правило, до давлений 500 кбар. Экспериментальные данные были получены с помощью специальных зарядов ВВ с плоской формой фронта детонации, в которых пластина с размещенными на ней образцами располагалась в контакте с зарядом. Повышение давлений ударного сжатия до 2 Мбар в образцах металлов со средним атомным номером и проведение измерений по методу торможения осуществлялись при использовании так называемых плоских разгонных сис-

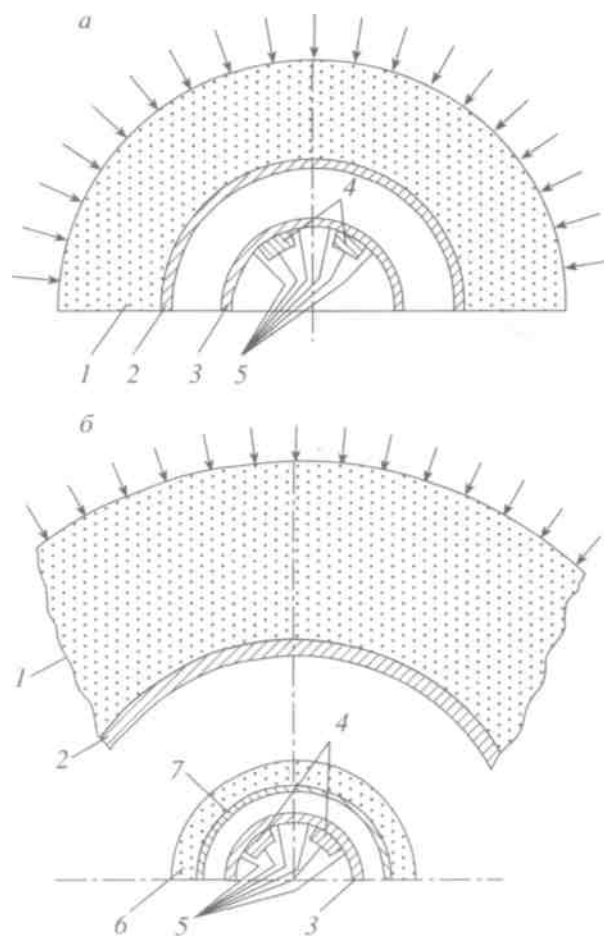


Рис. 1. Полусферический заряд ВВ, одновременно инициируемый по наружной поверхности

а – однокаскадный; *б* – двухкаскадный; 1, 6 – заряд ВВ соответственно первого и второго каскада, 2, 7 – металлическая оболочка-ударник соответственно первого и второго каскада, 3 – экран, 4 – исследуемые образцы, 5 – электроконтактные датчики

тем, в которых пластина-ударник разгонялась продуктами взрыва.

Уникальным инструментом для изучения ударной сжимаемости в мегабарном диапазоне давлений с 1948 г. во ВНИИЭФ стал предложенный Л.В. Альтшулером, Е.И. Забабахиним, Я.Б. Зельдовичем и К.К. Крупниковым полусферический заряд ВВ, одновременно инициируемый по наружной поверхности [8]. Вложенная во внутреннюю полость заряда ВВ тонкостенная металлическая оболочка-ударник ускорялась продуктами взрыва сходящейся к центру заряда детонационной волны до величины, превышающей первую космическую скорость, и ударяла по исследуемому полусферическому образцу (рис. 1а, б).

Первые результаты, опубликованные в 1958 г., для железа и еще восьми металлов при давлении до 5 Мбар, на порядок превышали данные, опубликованные американскими исследователями в

то время. В США уровень давления в 4 Мбар был достигнут только в начале 80-х годов с использованием двухступенчатых легкогазовых пушек.

В экспериментах советских ученых на взрывных лабораторных измерительных устройствах для многих металлов использовался диапазон давлений до 10 Мбар, существенно превосходящий давления, достигнутые в США. Информация о применявшихся в СССР генераторах ударных волн для изучения экстремальных состояний вещества при больших давлениях долгое время не публиковалась. Еще в 1988 г. ученые из Ливерморской лаборатории В. Неллис, Д. Мориарти и др. писали: "Абсолютные данные для меди и свинца при давлении 10 Мбар были получены Л.В. Альтшулером с сотрудниками на неизвестных генераторах ударных давлений и пока никем не воспроизведены". В кругу ученых не раз упоминалось некое сообщение в США о том, что русские для проведения исследований применили космические ракеты. Эти результаты были достигнуты на модернизированных полусферических измерительных устройствах.

Для измерений еще в более высоком диапазоне давлений во ВНИИЭФ в экспериментах по методу торможения получили применение "каскадные" измерительные системы. Принцип одномерного каскадного ускорения пластин предложил и обосновал в 1948 г. Е.И. Забабахин. По предложенной им схеме пластина, разогнанная продуктами взрыва первого заряда, ударяет по второму заряду и создает в нем пересжатую детонационную волну, которая, в свою очередь, разгоняет другую, более тонкую пластину (см. рис. 1).

Впервые давления, близкие к 10 Мбар, были получены в железе К.К. Крупниковым и МИ. Бражник на полусферическом двухкаскадном устройстве, разработанном Л.В. Альтшулером, С.Б. Кормером, К.К. Крупниковым, Б.Н. Леденевым [9]. В качестве первого каскада использовался вышеописанный полусферический однокаскадный заряд. В него монтировался второй каскад. Он представлял полусферический слой взрывчатого вещества с примыкавшей к нему с внутренней стороны стальной оболочкой толщиной 2 мм. На таком устройстве уже в начале 50-х годов были зарегистрированы ударные давления в железе 9.6 Мбар и уране до 16 Мбар, отвечающие скорости ударяющей железной оболочки 15.5 км/с.

Создаваемое устройством давление зависит от начальной плотности исследуемого образца. С целью расширения диапазона давлений, достижимых при ударном сжатии особо легких веществ, Ю.Ф. Алексеевым, Л.В. Альтшулером, В.П. Крупниковой во ВНИИЭФ в начале 50-х годов был предложен и реализован смесевой метод существенного повышения давления в легком материале

путем внесения в него дисперсной утяжеляющей малосжимаемой добавки [10]. Смесевой метод применялся и другими исследователями и с иными целями.

Продвинуться в область плотностей, превышающих достижимые при однократном ударном сжатии, позволяет режим косоугольного столкновения ударных волн, особенно - нерегулярный с образованием трех волн: падающей, головной и отраженной (в которой осуществляется повторное сжатие вещества). В твердых телах такой режим впервые был обнаружен Е.А. Феоктистовой, в 50-х годах он был использован для получения данных о двукратном ударном сжатии ряда металлов [11].

Степень сжатия ДМ в атомной бомбе определяется не только ударными волнами, в которых вещество претерпевает скачкообразное увеличение плотности, но и последующим плавным - изэнтропическим изменением состояния материала. Поэтому, наряду с изучением ударного сжатия, во ВНИИЭФ проводились исследования изэнтропической сжимаемости, характеризующейся скоростью распространения слабых возмущений - скоростью звука в материале, сжатом ударной волной. Впервые экспериментальные значения скорости звука за фронтами ударных волн были получены Л.В. Альтшулером, С.Б. Кормером с сотрудниками [12]. Было разработано два метода измерений звуковых возмущений по регистрации их выхода на фронт ударной волны.

В первом, названном методом боковой разгрузки, определение скорости звука производилось при движении ударной волны по цилиндрическому образцу со ступенчатым профилем боковой поверхности. Волны расширения, распространяющиеся из исходной точки уступа, догоняют фронт, вызывая уменьшение давления в периферийной зоне. Скорость прихода головной волны разгрузки определялась по одновременности выхода ударной волны на торцевую поверхность образца. Этим методом впервые были зарегистрированы две системы распространения звуковых волн. Меньшую скорость имела пластическая волна, характеризующая объемную сжимаемость вещества, большую - упругая продольная волна, присущая одномерному сжатию. Данные были получены при давлении 400 кбар в меди и железе.

Второй - метод догоняющей разгрузки - был разработан совместно с Е.И. Забабахиним. Этим более информативным методом проводились дальнейшие измерения распространения упругих и пластических волн разгрузки. Сущность метода заключается в регистрации затухания ударной волны в толстом образце при ударе по нему тонкой пластиной. Значение скорости звука рассчитывалось по изменению параметров ударной волны на разгруженном участке ее траектории. К 1960 г. этим методом были проведены измере-

ния объемной скорости звука в ударно-сжатых алюминии, железе, меди и свинце в области давлений от 400 кбар до 3.5 Мбар. Метод догоняющей разгрузки получил значительное развитие в дальнейшем в связи с применением оптических способов регистрации затухания ударной волны в прозрачных жидкостях-индикаторах в работах американских исследователей, а также в Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН и в Институте проблем химической физики РАН.

В 60-е годы внимание экспериментаторов привлекло изучение ударного сжатия редкоземельных металлов (РЗМ). В нормальном состоянии РЗМ обладают плотноупакованной кристаллической структурой. Они трехвалентны и имеют электронную структуру, образованную внешними s-электронами, с внутренней полностью (лантан) или частично незаполненной f-оболочкой с различным числом электронов на них. Предполагалось, что приложение мегабарных давлений может "вдавить" наружные s-электроны в незаполненные f-оболочки и можно в результате структурного перехода получить сверхплотный металл. Однако, как показали уже первые исследования ударного сжатия, выполненные Л.В. Альтшулером, А.А. Бакановой и И.П. Дудолодовым, эти несколько наивные прогнозы оказались нереалистичными. В то же время при некоторых критических параметрах сжатия удалось зафиксировать резкие изломы ударных адиабат, свидетельствующие о немонотонном уменьшении сжимаемости редкоземельных металлов и отвечающие фазовому переходу второго рода, связанному с реконструкцией энергетических электронных спектров (рис. 2). Эти пионерские данные позже были уточнены в работах зарубежных исследователей (В. Гаст, Е. Роуз, В. Картер и др.), опубликованных в 1973-1975 гг.

РАСШИРЕНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ ВЕЩЕСТВА

Изучение ударного сжатия металлов динамическими методами дает сведения об энергии, давлении и плотности на ударных адиабатах. Для получения информации в широком диапазоне фазовой диаграммы Я.Б. Зельдович обосновал два метода: регистрация ударных адиабат пористого материала, то есть материала с уменьшенной начальной плотностью, и изэнтроп расширения ударно-сжатого материала [13]. В одних случаях это позволяет резко увеличить вклад тепловой энергии и, по сути, получить состояние сверхплотной неидеальной плазмы с сильным коллективным межчастичным взаимодействием. Приоритет в изучении ударных адиабат пористых образцов пониженной плотности принадлежит К.К. Крупникову и работавшим под его руководством М.И. Бражник и В.П. Крупниковой.

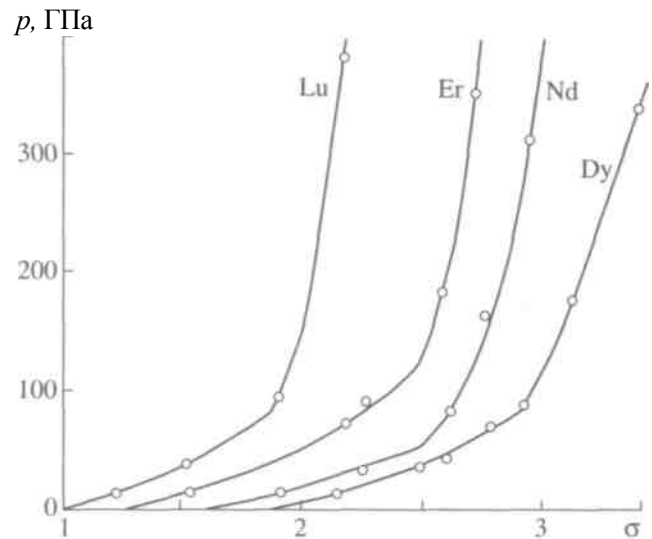


Рис. 2. Ударные адиабаты редкоземельных металлов. Параметр σ — степень, ударного сжатия мишени: $\sigma = \rho/\rho_0$, где ρ — плотность сжатого вещества мишени, ρ_0 — начальная плотность вещества мишени. Для наглядности кривые смещены по оси абсцисс: Er ($\sigma + 0.3$), Nd ($\sigma + 0.6$), Dy ($\sigma + 0.9$)

Первый предложенный Я.Б. Зельдовичем метод был реализован еще в начальный период становления динамических исследований в 1949 г., когда были получены данные об ударном сжатии пористых образцов железа и урана. Результаты по ударному сжатию пористого железа вошли в публикацию 1958 г. советских исследователей по ударной сжимаемости металлов при высоких давлениях. Хотя величина пористости исходного состояния (до 40%) не решила задачу существенного расширения исследованной области состояний, уже эти результаты позволили определить коэффициент Грюнайзена и уточнить уравнения состояния металлов вблизи ударных адиабат.

В полной мере экспериментальные исследования ударной сжимаемости образцов с разной начальной пористостью (вплоть до четырехкратной) впервые выполнены на вольфраме в диапазоне давлений до 5 Мбар; также была измерена скорость звука в ударно-сжатом пористом вольфраме [14]. Пористый образец после ударного сжатия приобретает меньшую конечную плотность, чем сплошной, из-за большего пути деформации и, следовательно, большего нагрева. Поэтому, чем больше начальная пористость образца, тем хуже он сжимается при ударном нагружении. Подтвердился парадоксальный вывод теории: приложение ударных давлений к малоплотным образцам высокой пористости не дожимает их даже до нормальной плотности; с возрастанием давления конечная плотность не увеличивается, как обычно, а наоборот — уменьшается, и ударная адиабата имеет аномальный ход: производная давления по плотности отрицательна. Однако,

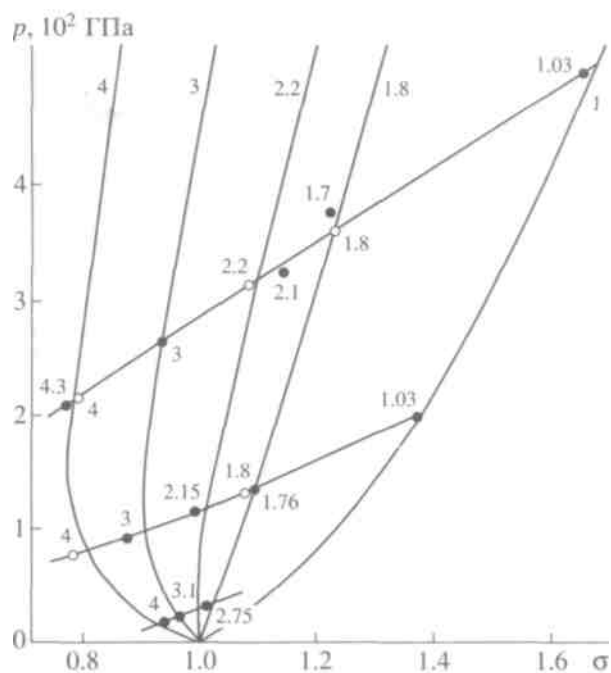


Рис. 3. Ударные адиабаты вольфрама разной начальной плотности

Черные кружки – данные измерений, белые – интерполяция данных по зависимостям, отвечающим измерениям на одном измерительном устройстве; цифры обозначают пористость, то есть отношение начальных плотностей сплошного и пористого металла

как показали эксперименты с вольфрамом, аномальный ход адиабат для таких образцов наблюдается лишь до некоторых критических давлений, выше которых производная адиабаты меняет знак на "нормальный" - положительный и адиабата приобретает обычный вид: с ростом давления плотность увеличивается (рис. 3).

Это восстановление "нормы" указало на значительное увеличение теплоемкости вещества, главным образом благодаря существенному вкладу, вносимому в теплоемкость возбуждаемыми при высокой температуре электронами.

Дальнейшее развитие этого направления сделано в работах СБ. Кормера, А.И. Фунтикова и др. [15], осуществивших аналогичные эксперименты в широкой области давлений для ряда металлов и ионных кристаллов. Подобно результатам, полученным ранее при ударном сжатии пористого вольфрама, в этих экспериментах адиабаты ударного сжатия пористых металлов также имели участки с положительными и отрицательными наклонами, что было обусловлено влиянием теплового возбуждения электронов. Полученные результаты побудили разработать новый тип полуэмпирического уравнения состояния с переменной теплоемкостью, позволяющий описать переход вещества в состояние сжатого газа. Наибольшее распространение получило

обобщенное уравнение состояния Кормера, учитывающее взаимодействие атомов и электронов.

Следующим шагом, расширившим область исследуемых состояний, стали результаты по ударному сжатию пористых металлов, с обладающими значительно большей пористостью, чем в предшествующих измерениях. Изготовление образцов для этих исследований явилось определенным технологическим достижением. Они были проведены на прецизионных устройствах в широком диапазоне давлений, позволили найти общие закономерности при сжатии пористых материалов - веерное расположение адиабат, давления "упаковки", изменения наклонов кривых на D - V -диаграммах, переход к предельным наклонам и др.

Существенное увеличение давлений ударного сжатия пористых металлов достигнуто в подземных ядерных взрывах. Измерения при давлениях в десятки мегабар были проведены В.Н. Зубаревым, Р.Ф. Труниным и другими для пористых меди, вольфрама и железа.

Расширение области исследований в P - V -пространстве фазовой диаграммы достигается также путем определения положения изэнтроп расширения из состояний ударного сжатия сплошных и пористых образцов. Обширные измерения энтроп расширения в "мягкие" преграды выполнены в ИХФ РАН (Черноголовка) В.Е. Фортовым, В.Я. Терновым и в ВНИИЭФ А.А. Бакановой, В.Н. Зубаревым, М.В. Жерноклетовым и другими. В качестве преград использовались вещества с известными ударными адиабатами: алюминий, тефлон, магний, аргон, ксенон, а также воздух при различных давлениях. Эти экспериментальные данные дали ценную информацию не только для построения полуэмпирических моделей уравнений состояния, но и позволили сопоставить их с чисто плазменными моделями, построенными из первых принципов, применимость которых установлена до "конденсированных" плотностей плазмы [16].

Изэнтропы расширения соединяют состояния одинаковой энтропии сверхплотной плазмы на ударных адиабатах с околочритическими состояниями жидкости и слабоионизированного пара. При вхождении в двухфазную область жидкость - пар они имеют согласующиеся с параметрами линии равновесия значения энергии и объема. Известные значения температуры и энтропии в области малых давлений и плотности на нижних участках изэнтроп позволяют вычислить параметры на всем их протяжении - построить полную P - V - T -диаграмму вещества. Идея Зельдовича определения температур по ударно-волновым экспериментам и измерениям конечных состояний при адиабатической разгрузке была впервые реализована для построения уравнения состояния цезия и меди в работах В.Е. Фортова и его сотрудников.

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В
УДАРНЫХ ВОЛНАХ

У многих твердых тел приложение ударного давления приводит к фазовым превращениям. К настоящему времени полиморфные переходы в ударных волнах зафиксированы у многих металлов, полупроводников, ионных соединений и практически у всех минералов и горных пород. Равенство давлений фазового перехода как в статике, так и в динамике является характерным для большинства превращений. Такое совпадение имеет место у железа, хлористого калия, кремния, германия и ряда других веществ.

Высокая скорость фазовых переходов в ударных волнах свидетельствует об их быстрой кинетике, основанной на сдвиговых деформациях вещества (так называемый мартенситный механизм). Образованию фазы высокого давления предшествует ударная волна исходной фазы. На фронте волны, отвечающей фазовым превращениям, создаются дефекты, становящиеся при надкритических условиях центрами кристаллизации. По образному выражению американского ученого Б. Алдера, "фронт ударной волны можно сравнить с мельницей, которая дробит неуплотненное вещество своей головной частью и затем переводит атомы в области высокой плотности в стабильные при таких условиях состояния".

Впервые структурные изменения в железе мартенситного типа были обнаружены по макроструктуре стальных образцов, испытавших ударно-волновое сжатие. Эти опыты проводились в 40-х годах в рентгеновской лаборатории Института машиноведения АН СССР под руководством создателя импульсной рентгенографии В.А. Цукермана [1]. Правильная интерпретация результатов оказалась возможной после открытия Д. Банкрофтом, Е. Петерсоном и С. Миншеллом в 1956 г. фазового перехода в железе. На фигурах травления, полученных В.А. Цукерманом, темные зоны на макроструктуре отвечали фазовому переходу, а границы зон - давлению фазового перехода, 130 кбар, совпадающему со значениями давления фазового перехода при статическом сжатии. Возникающие в результате одновременного подрыва шесть сходящихся к центру ударных волн сильно затухают, поэтому темные зоны фазовых переходов видны лишь вблизи зарядов, а также при наложениях соседних ударных волн и при кумулятивной встрече шести ударных волн на оси образца.

Во ВНИИЭФ изучению фазовых превращений в ударных волнах уделялось значительное внимание. В исследованиях использовались методы определения ударной сжимаемости и регистрации параметров за фронтом ударной волны, в том числе с применением манганиновых и электромагнитных датчиков, измерением оптических и

электрических параметров, изучением структурных изменений в сохранных после нагружения образцах. Объектами исследований явились многие элементы периодической системы, галогениды щелочных металлов, карбиды и нитриды, окислы, горные породы, органические вещества. Большой вклад в изучение фазовых превращений в ударных волнах внесен М.Н. Павловским с сотрудниками.

В работах А.Г. Иванова, С.А. Новикова и их сотрудников были исследованы особенности фазового превращения в железе. Впервые экспериментально было обнаружено возникновение в железе ударных волн разрежения, приводящих при их встречном взаимодействии к образованию "гладких" отколов. Анализ полученных экспериментальных результатов по железу был дан академиком Я.Б. Зельдовичем.

Изучение ударной сжимаемости графита до давления 900 кбар проведено в США Б. Алдером и Р. Христианом. Авторы предполагали, что при давлении 400 кбар происходит фазовый переход в структуру алмаза, а при более высоком давлении - в плотную упаковку металлического типа. Исследования ударного сжатия графита и монокристаллического алмаза М.Н. Павловским и другими подтвердили образование в ударных волнах алмазоподобной фазы, стабильной в исследованной области до давлений 6 Мбар, и опровергли предположение о возникновении еще более плотных металлических состояний.

Обширная информация об ударном сжатии минералов и горных пород получена в работах советских и американских ученых. В первых исследованиях американских ученых Д. Хьюза и Р. Макквина были определены ударные адиабаты габбро и дунита до давлений 700 кбар. Систематические исследования минералов и горных пород до давлений 1-4 Мбар проведены Л.В. Альтшулером и его сотрудниками. В настоящее время имеются данные по ударному сжатию для более чем 120 различных горных пород и минералов.

Первые исследования ударного сжатия кварца выполнены независимо Д. Вакерли (США) и А.Н. Дреминым с сотрудниками (ИХФ АН СССР) в 1962 г. Дальнейшее детальное изучение различных модификаций кварца с вариацией исходных состояний в широких диапазонах изменения термодинамических параметров проводилось в работах М.А. Подурца с сотрудниками во ВНИИЭФ и К.К. Крупникова и др. во ВНИИТФ.

Эксперименты показали, что почти все минералы и горные породы при некоторых критических давлениях до 100-500 кбар испытывают фазовые превращения с образованием плотных, относительно мало сжимаемых модификаций. До достижения этих давлений ударные адиабаты характеризуются большим разнообразием, после

фазовых переходов вид кривых становится подобным. В прямых экспериментах на кварците, доломите и других минералах было показано, что "наработка" новых фаз происходит на фронте ударной волны.

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-СЖАТЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Сильная ударная волна нагревает сжатое вещество до нескольких десятков тысяч градусов, и в прозрачных веществах излучение может проходить через несжатый слой, доставляя информацию о температуре, определяемой по яркостному излучению. Первые измерения яркостной температуры фронта сильной ударной волны в газах были выполнены И.Ш. Моделем. Анализ оптических явлений, сопровождающих мощные ударные волны в газах, проводился Я.Б. Зельдовичем и Ю.П. Райзером [5], объяснившими, в частности, эффект экранировки излучения слоем прогретой плазмы перед фронтом ударной волны.

Обширные исследования оптических свойств ударно-сжатых прозрачных конденсированных веществ были предприняты в середине 50-х годов во ВНИИЭФ СБ. Кормером и его сотрудниками - М.В. Синицыным, Г.А. Кирилловым, В.Д. Урлиным, К.Б. Юшко и другими [17]. Успеху исследований во многом способствовало непосредственное участие Я.Б. Зельдовича в анализе получаемых результатов. Эти работы положили начало проведению во многом уникальных до сих пор исследований. Измерения температур ударно-сжатых прозрачных ионных кристаллов и некоторых диэлектриков дали существенное уточнение уравнений состояния подобного класса веществ и определили их кривые плавления до весьма высоких давлений 2.5 Мбар, ранее известные в пределах нескольких десятков кбар. Результаты показали особенности плавления при высоких давлениях: почти линейный рост теплоты плавления с температурой и существенное уменьшение скачка объемов при плавлении при высоких давлениях. Впервые было показано, что при сжатии ~ в 2 раза кристаллы LiF, NaCl, KCl и CsBr остаются в твердом состоянии до температуры примерно 4000 К. Полученные данные показали, что уравнение состояния твердой фазы исследованных кристаллов в форме Ми-Грюнайзена с дебаевской функцией для теплоемкости удовлетворительно описывает не только связь давления с плотностью вдоль ударной адиабаты, но и температуру ударно-сжатого твердого тела до кривой плавления. Это свидетельствует о достаточно малом влиянии ангармоничности тепловых колебаний решетки на теплоемкость твердой фазы веществ.

Измерения яркостной температуры ударно-сжатых ионных кристаллов позволили установить ряд интересных эффектов. В частности, ис-

следования показали, что возникающее неравновесное свечение имеет люминесцентную природу. С ростом давления ударного сжатия яркость люминесцентного свечения становится меньше теплового, и его влияние на измеряемую температуру исчезает.

Неравновесное излучение было зарегистрировано также при ударном сжатии ионных кристаллов в области давлений 2-5 Мбар. В экспериментах яркость излучения оказалась много меньше той, которая отвечает равновесной температуре. Объяснить эффект удалось Я.Б. Зельдовичу, СБ. Кормеру и В.Д. Урлину за счет кинетики перехода к термодинамическому равновесию между электронами и решеткой во фронте ударной волны.

Экспериментальные исследования оптических свойств при ударном сжатии были выполнены также для жидких инертных газов. На примере другого класса веществ нашли подтверждение идеи, заложенные в построение многофазового уравнения состояния в плазменной области.

МУЛЬТИМЕГАБАРНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

В 60-х гг. было реализовано высказанное ранее Бриджменом соображение о возможности использования атомных взрывов в экспериментах по изучению свойств веществ при сверхвысоких давлениях. Московский договор (1963) о запрещении проведения ядерных взрывов в трех средах, разрешив подземные ядерные испытания, предоставил ученым уникальные возможности проведения исследований при сверхвысоких давлениях.

Первые результативные исследования ударного сжатия в условиях подземного ядерного взрыва с использованием метода отражения были проведены в 1966 г. во ВНИИЭФ (Альтшулер, Моисеев, Попов) и во ВНИИТФ, где они осуществлялись при постоянном внимании Е.И. Забабахина под руководством К.К. Крупникова, в группе которого методом отражения были получены данные для гранита - сжатие в 2.66 раза при давлении в 6.5 Мбар, в 2 раза превышающем уровень давлений, достигнутых для этого материала в лабораторных опытах.

В дальнейшем сотрудниками ВНИИЭФ в группе Р.Ф. Трунина возможности ядерного взрыва были использованы в полной мере: в измерениях по методу торможения диапазон давлений для железа был расширен до 100 Мбар; затем, с использованием железа в качестве эталона, те же давления были достигнуты для свинца, меди, кадмия и урана, а легкие вещества - алюминий, кварц, вода и некоторые другие - были исследованы до давлений в 20 Мбар [18].

Результаты измерений, опубликованные в 1992-1993 гг., после обработки их совместно с лабораторными данными придали железу статус

металла-эталоны. Сравнение экспериментальных данных, полученных при подземных взрывах, с расчетами по квантово-статистической модели Томаса-Ферми, усовершенствованной за счет введения квантовых и обменных поправок Д.А. Киржницем (ФИАН, ИПМ) и учета взаимодействия ядер В.П. Копышевым (модель ТФПК), дало возможность оценить нижнюю границу применимости квазиклассической модели.

Другой метод получения информации в ближней зоне подземного ядерного взрыва был назван методом репера. Он был разработан во ВНИИТФ Е.Н. Аврориным, Л.П. Волковым, В.А. Симоненко и другими. Метод основан на регистрации γ -излучения от специальных маркеров - таблеток радиоактивного вещества, размещенных в исследуемом веществе. Он позволяет регистрировать волновые и массовые скорости ударной волны.

Полученные в лабораторных и подземных условиях данные для металлов описываются в широком диапазоне давлений соотношениями параметров на ударной адиабате. Нижние по давлению участки воспроизводят лабораторные измерения, верхние сближаются с квантово-статистическими результатами, полученными по модели ТФПК. В точках сопряжения зависимостей монотонность кривых обеспечивается равенством функций и их производных до второго порядка. Монотонность ударных адиабат объясняется расширением зон в результате наложения волновых функций атомов при сжатии. По этой же причине монотонно изменяются на изобарах удельные объемы в зависимости от атомных номеров.

НЕВЗРЫВНЫЕ ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ

Принципиально другой и особенно чувствительный способ исследования изэнтропической сжимаемости и уравнений состояний ДМ урана и плутония был предложен во ВНИИЭФ в 1957 г. Л.В. Альтшулером, Я.Б. Зельдовичем и Ю.М. Стяжкиным [19]. Этот метод позволяет достигать на лабораторных установках таких же, как при ядерных взрывах, сверхвысоких давлений.

Метод был реализован экспериментально в конце 50-х годов и назван методом невзрывных цепных реакций (НЦР). В США он также был разработан в это же время под названием метода "гидроядерных реакций". Метод НЦР заключается в проведении взрывных опытов со сферическими зарядами ВВ, содержащими уменьшенные массы ДМ, при которых не происходит ядерный взрыв. За максимально допустимый уровень энерговыделения был принят 1 кг тротилового эквивалента, отвечающий огромному ($\sim 10^{17}$) числу делений и соответствующему числу выходящих из заряда нейтронов. Расчеты гидродинамической стадии в таких зарядах, отвечающие опы-

там НЦР, ведутся в диапазоне масс активной зоны, когда выделяющаяся ядерная энергия практически не влияет на процессы сжатия и разлета активной зоны.

Интенсивность размножения нейтронов и, следовательно, интегральное число делений во взрывном опыте в сильной степени зависит от максимального сжатия активной зоны. Количественная связь между зарегистрированными в опыте числом нейтронов деления и достигнутыми плотностями устанавливается с помощью гидродинамических и нейтронных расчетов. Изменение степени сжатия на 1% изменяет поток нейтронов на 2 порядка. Наличие такого сверхчувствительного "датчика" позволило отказаться от обычных датчиков, располагаемых в центральной области сжатия полусферических конструкций (рис. 1) и провести измерения существенно ближе к центру кумулятивного схождения ударной сферической волны. В результате проведенные исследования дали весьма точную информацию об изэнтропической сжимаемости ДМ до давлений 100-150 Мбар, уравнениях состояния ДМ и физических процессах, протекающих в ядерно-активной зоне.

Разработка и реализация метода НЦР имела особое значение для СССР и США при проведении разработок ядерного оружия в период запрещения полномасштабных ядерных испытаний в трех сферах - на земле, в атмосфере и воде. Об этом пишет в своих "Воспоминаниях" А.Д. Сахаров, об этом Л.В. Альтшулеру говорили американские ученые в ЛотГ> Ал амосе в 1991 г. Впервые метод НЦР был доложен Ю.М. Стяжкиным на симпозиуме в Дубне в 1996 г.

Представленные результаты некоторых исследований в СССР не отражают из-за ограниченных размеров статьи полного объема проведенных работ. Вне рассмотрения осталось изучение прочности и вязкости в ударно-сжатых металлах, ударного сжатия кварца, металлических сплавов, гидридов, карбидов, нитридов металлов, результаты импульсных рентгеноструктурных измерений в ударных волнах и другие исследования.

В размышлениях американского ученого Р. Киллера о работе академика Я.Б. Зельдовича в области динамической физики высоких давлений отмечается, что "работы его коллег и учеников - профессора Л.В. Альтшулера, члена-корреспондента РАН СБ. Кормера и академика В.Е. Фортова значительно превосходят работы американских исследователей в той же области как в качестве, так и в количестве достигнутых результатов" [20]. Создатель американской водородной бомбы

Э. Теллер на Международной конференции по физике высоких плотностей энергий еще в 1969 г., наряду с учеными из Лос-Аламоса, упомянул и советских ученых Я.Б. Зельдовича и Л.В. Альтшулера, "которые, возможно, сделали больше всего в открытии этого нового поля исследований".

ЛИТЕРАТУРА

1. *Альтшулер Л.В.* Затерянный мир Харитона // Атом. 2000-2001. № 12-13.
2. *Александров А.П.* Годы с И.В. Курчатовым // Наука и жизнь. 1983. № 2.
3. *Александров А.П.* Документы и воспоминания. М.: ИзДАТ, 2003. С. 30.
4. *Цукерман В.А., Азарх З.М.* Люди и взрывы. Арзамас-16, 1994.
5. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
6. *Альтшулер Л.В., Крупников К.К., Леденев Б.Н. и др.* Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1958. Вып. 4. С. 874-885.
7. *Фортон В.Е., Якубов И.Т.* Неидеальная плазма. М.: Атомэнергоиздат, 1994.
8. *Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Крупников К.К. и др.* Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия вещества в ударных волнах // УФН. 1996. № 5.
9. *Альтшулер Л.В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. 1965. № 2. С. 197-258.
10. *Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П.* Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. №4. С.152-155.
11. *Альтшулер Л.В., Кормер СБ., Баканова А.А. и др.* Нерегулярные режимы косоугольного столкновения ударных волн в твердых телах // ЖЭТФ. 1961. Вып. 11. С. 1382-1393.
12. *Альтшулер Л.В., Кормер СБ., Бражник М.И. и др.* Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1960. Вып. 4. С. 1061-1073.
13. *Зельдович Я.Б.* Об исследовании уравнения состояния с помощью механических измерений // ЖЭТФ. 1957. Вып. 6. С. 1577-1578.
14. *Крупников К.К., Бражник М.И., Крупникова В.П.* Ударное сжатие пористого вольфрама // ЖЭТФ. 1962. Вып. 3. С. 675-685.
15. *Кормер СБ., Фунтиков А.И., Урлин В.Д., Колесникова А.Н.* Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах. // ЖЭТФ. 1962. Вып. 3. С. 686-702.
16. *Фортон В.Е., Терной В.Я., Жерноклетов М.В., Мочалов М.А., Михайлов А.Л. и др.* Ионизация давлением плазмы в мегабарном диапазоне динамических давлений // ЖЭТФ. 2003. Т. 124. Вып. 8. С. 288.
17. *Кормер СБ.* Оптические исследования свойств ударно-сжатых конденсированных диэлектриков // УФН. 1968. №4.
18. *Трунин Р.Ф.* Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов // УФН. 1994. № 11.
19. *Альтшулер Л.В., Зельдович Я.Б., Стяжкин Ю.М.* Исследование изэнтропической сжимаемости и уравнения состояния делящихся материалов // УФН. 1997. №1.
20. *Киллер Р.Н.* Размышления американского ученого о работе академика Я.Б. Зельдовича в области динамической физики высоких давлений // УФН. 1995. № 5.