

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА

Я.Б. Зельдович и проблемы уравнений состояния вещества
в экстремальных условиях

В.Е. Фортов, И.В. Ломоносов

Среди поразительных по широте спектра научных интересов Якова Борисовича Зельдовича — от общих проблем химической физики, кинетики, горения, детонации и ударных волн до физики элементарных частиц и космологии — физика экстремальных состояний вещества занимает особое место. Рассмотрены отдельные задачи физики ударных волн и уравнения состояния вещества, над которыми работал ЯБ. Им был выдвинут ряд основополагающих идей и методов: построение термодинамически полных уравнений состояния по данным ударно-волновых экспериментов, методы ударного сжатия пористого вещества и адиабатического расширения ударно-сжатого вещества. На практических примерах показано, как широко эти фундаментальные идеи используются и развиваются в современной физике экстремальных состояний вещества.

PACS numbers: 01.60. + q, 62.50. – p, 64.10. + h, 64.30. – t, 65.40. – b

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403b.0231

Содержание

1. Введение (231).
 2. Ударные волны и экстремальные состояния вещества (234).
 3. Задача Ферми–Зельдовича. Построение термодинамически полного уравнения состояния по результатам динамических измерений (236).
 4. Ударное сжатие пористого вещества (237).
 5. Изотропическое расширение ударно-сжатых веществ (239).
 6. Модели уравнения состояния вещества (241).
 7. Заключение (243).
- Список литературы (244).

1. Введение

Кто-то из классиков естествознания, кажется Л.Д. Ландау, сказал, что если учёного и его работы помнят спустя пять лет после его смерти, то это выдающийся учёный.

Вот уже более 25 лет мы живём без Якова Борисовича Зельдовича, но такое ощущение, что он где-то рядом. Его идеи, предложения, советы и сегодня составляют основу современных исследований по горению, детонации, уравнениям состояния вещества и физико-химии ударных и детонационных волн, т.е. по всему тому, что сегодня

принято называть "физика экстремальных состояний вещества" [1–10] или "физика высоких плотностей энергии" [11].

Работы в этой области уже давно ведутся при других параметрах, иными методами, на других установках людьми, никогда не видевшими Якова Борисовича, но, по существу, являющимися его учениками в третьем и четвёртом поколениях, — учениками, потому что они учились и учатся по "библии ударных волн" — замечательной книге Я.Б. Зельдовича и Ю.П. Райзера *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* [4], а также у прямых учеников ЯБ и развивают то новое, что было заложено трудами ЯБ.

Ударные и детонационные волны [1, 2, 4] были, пожалуй, первой и самой глубокой любовью ЯБ, а его путь в науке был последовательным изучением взрывных явлений нарастающей интенсивности разной физической природы — от химических взрывов до взрыва ядерного и взрывов космического масштаба.

Я.Б. Зельдович внёс основополагающий вклад во многие научные направления; в последние годы был всецело поглощён космологией, но всегда испытывал "особую слабость" к мощным ударным и детонационным волнам, называя эту тему "вечнозелёной", был в курсе текущих исследований, собирал материал для новой монографии по ударным волнам. Он живо и неформально интересовался происходящими в этой области физики событиями и новостями, был на высоком профессиональном уровне в этих вопросах.

Любопытно, что ЯБ создал свою знаменитую теорию горения и детонации более чем вовремя — как раз в тридцатые годы, к открытию в 1939 г. О. Ганном и Р. Штрассманом деления ядер урана под действием нейтронов, что и ознаменовало вхождение человечества в атомную эру. Именно поэтому академик Я.Б. Зельдович навсегда останется в истории технической цивилизации одним из ярчайших пионеров этой эпохи.

В.Е. Фортов. Российская академия наук,
Ленинский просп. 14, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: fortov@ras.ru

И.В. Ломоносов. Институт проблем химической физики РАН,
просп. Академика Семёнова 1, 142432 Черноголовка,
Московская обл., Российская Федерация
E-mail: ivl143@icp.ac.ru
Томский государственный университет,
просп. Ленина 36, 634050 Томск, Российская Федерация

Статья поступила 22 ноября 2013 г.,
после доработки 23 декабря 2013 г.

ЯБ очень много и продуктивно работал сам и требовал того же от других. Обсуждения кончались предложением доделать что-то и завтра-послезавтра принести результаты. Поражала его ответственность и обязательность в научных делах.

Его обзорные доклады на симпозиумах по горению и взрыву были современными, яркими и глубокими с большой ориентацией на перспективу — не на дела дней минувших, как это часто любят делать "научные генералы". При этом ЯБ тщательно готовил свои выступления и доклады, советовался с широким кругом специалистов, просматривал литературу и будоражил коллег новыми идеями и предложениями. Он остро чувствовал свою ответственность за состояние науки о горении и взрыве в стране, всячески возбуждал активность и искал новые задачи, подходы. ЯБ создал и возглавил в Академии сильный и многопрофильный Совет по горению.

Одним из первых ЯБ оценил возможности импульсных лазеров [12] и пучков заряженных частиц [13] для генерации ударных волн и активно призывал этим заниматься. Сегодня это вылилось в одно из наиболее серьёзных направлений в физике высоких плотностей энергии с множеством новых и неожиданных идей, эффектов и приложений. Также ЯБ продвигал работы по физике неидеальной плазмы [14], считая, что именно в этой области есть много интересного и неожиданного, что именно мощные ударные волны — наиболее подходящий инструмент для изучения таких экзотических на Земле, но столь распространённых в космосе [10] состояний вещества. Он сразу же оценил возможности мощных электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и активно участвовал в работах по математическому моделированию динамики плазмы, рэлей-тейлоровской неустойчивости, расчётам нестационарных явлений в детонации и моделированию критического диаметра направленного взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Его феноменальная интуиция здесь была неоценимой.

Начав научную работу лаборантом, ЯБ очень тонко понимал эксперимент, много и с удовольствием работал с экспериментаторами, и эта работа была крайне продуктивной для всех её участников. Обладая огромным опытом прикладных и инженерных работ, он в полной мере понимал специфику ограничения теоретических и экспериментальных методов, говоря: "Теоретики на 100 % верят экспериментальным данным, а экспериментаторы считают теоретический результат стопроцентной истиной. Но те и другие не знают, что жизнь где-то посередине".

Приезжая к нам на взрывные стенды в Черногловку, часто со своими друзьями академиками Н.Н. Семёновым и Ю.Б. Харитоновым, ЯБ часами обсуждал постановки и результаты опытов, вникал, казалось бы, в мелкие детали и всегда предлагал остроумные подходы, часто выводившие из тупика. Но главное — это его способность интерпретировать экспериментальные данные, часто даже без оценок, благодаря удивительной интуиции и большому опыту спецработ.

В начале 1970-х годов, в эпоху расцвета импульсного термояда, возникла идея использовать конические мишени для квазисферического ударно-волнового сжатия термоядерной плазмы. Идея показалась привлекательной. Собралась большая кооперация: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) использовал реляти-

вистские электронные пучки, Институт общей физики АН СССР (ИОФАН) — лазеры, Филиал Института химической физики АН СССР (ФИХФ) — химические взрывчатые вещества и электровзрывы фольг. Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау взялся за теорию. Организовали кооперацию быстро, без типичной для нашего времени волокиты, уймы бумаг и формализма. В первых же выстрелах получили 10^3 – 10^7 термоядерных DD-нейтронов.

Приехало большое начальство — Н.Н. Семёнов, А.М. Прохоров, Ю.Б. Харитон, проверили всё ещё раз — нейтроны подтвердились. Возникла интересная перспектива приложений, связанная с благоприятным скейлингом по размеру мишени. ЯБ внимательно ознакомился с данными, предложил ряд новых постановок, которые показали определяющую роль кумулятивных эффектов, нарушающих скейлинг, но удивительно хорошо описывающих практически все опытные данные.

Работая над этой задачей, он призывал шире использовать технику химического ВВ для получения горячей плазмы, как термоядерной, так и неидеальной. Кстати, одна из похожих взрывных термоядерных идей в комбинации с электродинамическим преднагревом получила сейчас неожиданное и перспективное развитие [15].

ЯБ дал путёвку в жизнь и другим направлениям работ, основным на применении ударных волн в физике неидеальной плазмы. Хорошо известен его основополагающий вклад в динамическую физику высоких давлений: ЯБ вместе со своими коллегами (Л.В. Альтшулером, С.Б. Кормером, В.В. Крупниковым, А.А. Бакановой) провели пионерские эксперименты по ударно-волновому сжатию веществ до мегабарных давлений. Эти опыты настолько опередили своё время, что американские коллеги, не зная деталей генерации, полагали даже, что эти ультравысокие давления получены при столкновении баллистических ракет на орбите Земли. Эти замечательные работы 1960-х годов относились к металлам и диэлектрикам, в то время как плазменные состояния были вне сферы действия динамической техники высоких давлений.

В начале 1970-х годов в Черногловке на межинститутском семинаре (который вёл тогда академик Н.Н. Семёнов), где собирались учёные всех институтов центра, обсуждался вопрос о плазме полупроводников. По ходу докладов выяснилось, что очень мало известно о физических свойствах плотной плазмы с сильным межчастичным взаимодействием, о её фазовом составе и термодинамике. Возникла острая дискуссия, и мы предложили провести динамические эксперименты в этой области, отметив, между прочим, что известны параметры критических точек только у трёх из всех металлов, составляющих 80 % всех элементов периодической системы.

Академик Н.Н. Семёнов, который до этого спокойно вёл дискуссию, попивая крепкий чай, не на шутку встревожился: "Это полное безобразие! Не может такого быть! Вы что-то путаете. Мы ещё до войны говорили с Зельдовичем об измерениях критических точек металлов. Неужели с тех пор ничего не сделано? Я пошёл ему звонить!" Минут через двадцать Николай Николаевич вернулся в аудиторию ещё более расстроенный и сказал, что Зельдович подтвердил отсутствие данных по околокритическим параметрам металлов. Дело в том, что параметры критических точек очень высоки и недоступны для традиционной техники физического экспери-



Фото 1. Третий Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву, 5–10 июля 1971 г., Ленинград. На переднем плане академик Я.Б. Зельдович (слева) и аспирант В.Е. Фортов. Одному из авторов настоящего обзора (В.Е.Ф.) посчастливилось познакомиться с ЯБ и быть свидетелем "ренессансного" периода его ударно-волнового творчества. До сих пор поражает мощь и продуктивность интеллекта, абсолютная преданность науке и обаяние этой выдающейся личности, определившей облик, состояние и перспективы науки об ударных и детонационных волнах на многие годы вперед.

Моё (В.Е.Ф.) знакомство с ЯБ состоялось заочно где-то в середине 1960-х годов, когда нам — студентам аэрофизического факультета Московского физико-технического института (МФТИ) — читали секретный курс физической газодинамики, имея в виду подготовку специалистов для работы над ядерными и плазменными ракетными двигателями, а также над гиперзвуковой аэродинамикой входа в атмосферу боеголовки и космических кораблей. Так вот, добрая половина необходимого нам материала содержалась в только что вышедшей книге Я.Б. Зельдовича и Ю.П. Райзера [4], которой широко пользовались наши преподаватели и которую я видел на рабочих столах разработчиков ракетной техники в сверхсекретном тогда НИИ-1 (ныне Государственный научный центр им. М.В. Келдыша).

Именно работы по физике ударных волн привели к нашему скорому личному знакомству. Дело в том, что для создания ядерного ракетного двигателя с плазменным реактором необходимы сведения об уравнении состояния, транспортных свойствах и составе плазмы урана, водорода, лития в области высоких давлений и температур. Проблема оказалась трудной и вполне фундаментальной, а наш руководитель проекта член-корреспондент Академии наук СССР В.М. Иевлев, обладая большой широтой взглядов и физической интуицией, поставил в Министерстве общего машиностроения масштабные исследования фундаментальных свойств неидеальной плазмы.

В одной из созданных тогда установок ударные волны применялись не только для сжатия и разогрева плазмы цезия, но и одновременно для измерений параметров уравнений состояния ударно-сжатой плазмы. Данные получались в термодинамически неполном виде, так как не содержали температуру и энтропию. Темой моего диплома, а затем и кандидатской диссертации стало построение термодинамически полного уравнения состояния по данным ударно-волновых измерений, получившее впоследствии название "проблема Ферми–Зельдовича". Выполнив эту задачу в достаточно общем виде и применив этот формализм к неидеальной плазме цезия и других металлов, я опубликовал результаты в *Журнале экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)* [17] и, закончив аспирантуру, был вынужден кардинально сменить тематику. Отсутствие московской прописки и более чем туманные перспективы с жильём привели к распределению во Владивостокский институт автоматики. Был куплен билет и получены подъёмные. Оставалась последняя формальность — сделать двадцатиминутный доклад на Симпозиуме по горению и взрыву в Ленинграде и покончить с ударно-волновой тематикой, как казалось, навсегда.

В маленькой аудитории было полно народу, а в первом ряду в одиночестве сидел плотный подвижный человек средних лет, который, перебивая докладчика, вполне раскованно вёл дискуссию с элементами агрессивности и нажима. Досталось и мне, но, не зная, что это "сам Зельдович", я тоже не был вполне политкорректен. Словом, сильно поспорили, а когда мне сказали, кто был мой оппонент, я лишился дара речи. После моего доклада и пикировки ЯБ вполне спокойно и доброжелательно продолжил дискуссию в коридоре, предложив ряд новых содержательных задач в развитие доклада. Я с извинениями стал отказываться, ссылаясь на отъезд и смену тематики. "Сейчас я всё устрою!" — сказал ЯБ и тут же в фойе конференции подвёл меня к академику Н.Н. Семёнову и члену-корреспонденту АН СССР Ф.И. Дубовицкому, которые пригласили меня в Черногоровку, что я считаю большой своей жизненной удачей и за что всю жизнь буду благодарен ЯБ. Большой удачей я считаю и то, что таким образом я попал на "орбиту Зельдовича" и имел счастье многие годы общаться, работать с этим феноменальным человеком и учиться у него.

Кстати, в том же разговоре он обратил внимание на свою короткую заметку в [18], в которой он развивал похожие идеи и на которую я не сослался. Моё незнание этой работы ЯБ резко осудил, продемонстрировав особую щепетильность людей этого круга (Л.В. Альтшулер, Г.М. Гандельман, С.Б. Кормер) к вопросам приоритета. За этим, мне кажется, стоит не только естественное желание "застолбить" свои результаты, но и, что много важнее, — большое уважение к труду и результатам коллег и, конечно, к своему собственному, необходимость справедливой оценки результата, корректность и внутренняя культура человеческих взаимоотношений в науке. Всё это сейчас как-то теряется и уходит и у нас, и за границей. Люди увлекаются самоцитированием и стараются не замечать сделанного другими. Наверное, это издержки системы грантов, основанной на особой технике подготовки бумаг для референтов и, в конечном счёте, на особой технике выбивания денег.

И ещё у ЯБ была феноменальная память. Мог назвать не только автора и номер тома, но и страницу, где можно подробнее прочесть о том или ином физическом процессе. Как-то мы обсуждали мою работу по расширению и сжатию материала, и он говорит: "Вы не учили такой-то механизм". Я спрашиваю: "А где об этом можно почитать?" — "В журнале *Physical Review* 1942 г.". Я решил, что такой журнал мне нигде не достать. Всё-таки тогда шла война — Сталинград — и было не до научных журналов. Тем не менее пошёл в библиотеку. И что вы думаете? Все номера за 1942 г. стояли на полке! Во время войны государство тратило деньги на то, чтобы учёные могли следить за мировыми научными достижениями и нормально работать!

мента! ЯБ сказал Семёнову, что это интересная и трудная область и он даже предсказывал вместе с Ландау [16] фазовые переходы в околокритической плазме в связи с её металлизацией. Тогда Зельдович даже придумал соответствующий эксперимент, "хотел стрелять в цезий из винтовки", но в то время ничего путного не вышло, так как возникающие даже в легкокипящем цезии параметры плазмы сильно не дотягивали до критики. Н.Н. Семёнов, посетовав на судьбу и неповоротливость своих сотрудников, дал "зелёный свет" нашим работам по физике динамической плазмы, снабдив её своей неформальной поддержкой до конца своих дней, а на замечание из зала, что в плане института такой темы нет, резонно заметил, что "и вас когда-то в плане не было".

Этот эпизод, как и многие примеры такого рода, вполне передаёт дух научной свободы и демократизма, который царил в нашей Академии наук тех лет и который так отличается от сегодняшнего смутного времени, когда во главу угла вместо живого дела ставят "концепции", "приоритеты" и "лоты". А реальное научное дело годами барахтается в бюрократическом болоте и, конечно, благополучно глохнет в безответственности и бестолковщине толпы околонуучных паразитов-начальников.

Будучи человеком, азартно увлечённым наукой, переполненным идеями, ЯБ находил и притягивал к себе способных людей и плодотворно с ними работал, мало обращая внимание на формальности, чиновничество и субординацию, чем, как мне кажется, раздражал некоторых начальников, для которых он часто не находил нескольких минут (в основном для обсуждения личных выборных дел), в то время как его ученики и коллеги проводили с ЯБ многочасовые дискуссии и писали совместные статьи. Мне не известны реальные мотивы его прохладного приёма в ИХФ, но я убеждён, что если бы ЯБ после "исхода" из Арзамаса оказался в родном ему Институте химической физики, то польза нашему делу была бы огромная, в особенности в связи с наступившим в 1980-х годах для него и нас "ренессансом" горения и взрыва.

Работы по критической точке металлов в результате "телефонного" импульса Зельдовича получили энергичное развитие. Возник метод адиабат разгрузки, позволивший достигнуть околокритических состояний у многих металлов и измерить параметры высокотемпературной части их кривых кипения именно в той области, которую Ландау и Зельдович считали наиболее трудной и интересной с точки зрения металлизации и рельефного проявления эффектов неидеальности [16]. Жаль, что ЯБ не увидел эти результаты, как и недавние результаты проявления плазменного фазового перехода [19], ионизации плазмы мегабарным давлением [20] или проблему вязкости неидеальной электромагнитной и кварк-глюонной плазмы [21].

Остро чувствуя пустоту, которую оставил уход Якова Борисовича, мы всё же должны быть бесконечно благодарны ЯБ за то многое, что он дал нам всем в науке и в жизни: за этот пример безукоризненного поведения в трудных и неоднозначных ситуациях и за ту (потерянную навсегда!) возможность просто позвонить ему и рассказать о новом — уж он-то оценит! Именно ЯБ мы бы и хотели рассказать о тех новых результатах, о которых пойдёт речь в последующих разделах этого краткого обзора.

2. Ударные волны и экстремальные состояния вещества

Уравнение состояния — функциональная зависимость между параметрами, характеризующими состояние вещества, — является основной количественной характеристикой вещества, дающей возможность применения общего формального аппарата термодинамики и динамики сплошных сред (математической физики) к описанию различных физических объектов и процессов чрезвычайно разнообразной природы — от тепловых машин и биологических структур до ультраэкстремальных условий Большого взрыва и релятивистских адронных столкновений [11, 22].

Законы сохранения являются отражением наиболее фундаментальных свойств симметрии пространства-времени (теорема Нётер); законы сохранения (массы, импульса и энергии) в максимально общем математическом виде отражают всю совокупность процессов в окружающей нас природе, в то время как уравнение состояния (УРС) вводит в этот общий формализм и конкретную количественную специфику именно данного (конкретного) состояния вещества: газа, жидкости, твёрдого тела, электромагнитной или кварк-глюонной плазмы, излучения ядерной материи. Поэтому интерес к УРС вещества всегда был достаточно высок не только с точки зрения многочисленных прагматических (технических и энергетических) приложений, но и с точки зрения понимания и описания процессов и явлений при экстремально высоких концентрациях энергии — на стадиях Большого взрыва, а также на конечных стадиях эволюции астрофизических объектов (нейтронных звёзд, чёрных дыр), когда под действием гравитационного сжатия и термоядерного энерговыделения реализуются ультравысокие давления и температуры ядерного вещества [5, 10, 23–30]. Революционные открытия в астрономии последних десятилетий [5, 10, 13, 26–35] (нейтронные звёзды, пульсары, чёрные дыры, кротовые норы, γ -всплески, экзопланеты) свидетельствуют о новых примерах экстремальных состояний, изучение которых необходимо для решения принципиальных вопросов современной астрофизики.

Начало исследований высоких давлений в XX в. связано с пионерскими работами П. Бриджмена [36], удостоенными в 1946 г. Нобелевской премией* "за изоб-

* Интересно отметить, что ещё в 1918 г., то есть за 28 лет до присуждения Перси Бриджмену Нобелевской премии, в самом первом томе журнала *Успехи физических наук (УФН)* редактор-основатель *УФН* (академик П.П. Лазарев) и его помощники (кураторы — аналог нынешней редколлегии *УФН* — академики А.Н. Крылов и П.И. Вальден) сочли необходимым рассказать читателям журнала (как об одном из самых выдающихся успехов в экспериментальной физике тех лет!) о работах Бриджмена, поместив в *УФН* (в первых трёх последовательных выпусках 1918 г.) подробнейший обзор А.В. Раковского "Исследования Бриджмена в области высоких давлений" [37], который завершился словами: "Поскольку можно судить по статьям Бриджмена, в ближайшем времени мы должны ожидать от него не только новых экспериментальных исследований, но и ряда теоретических изысканий в изучаемой им области. Нам остаётся терпеливо ждать и горячо пожелать молодому (родился в 1882 г.) американскому учёному дальнейших успехов" [37, с. 203]. А в 1995 г. уже наоборот — американский учёный Н. Киилер говорит о талантливых исследователях из Черногловки — учениках школы Я.Б. Зельдовича, отмечая уникальность их работ (и в чём-то аналогичность работам Бриджмена) по созданию совершенно новой области физики — динамической физики плотной плазмы [38, с. 597]. (*Примеч. ред.*)

речение прибора, позволяющего создавать сверхвысокие давления, и за открытия, сделанные в связи с этим в физике высоких давлений". Эти исследования сжимаемости и других физических свойств веществ проводились в условиях статического эксперимента при давлениях до порядка 10 ГПа¹. Можно только поражаться удивительной прозорливости классика, который отмечал [39]: "Нет сомнений, что наиболее высокие давления будут достигнуты и в дальнейшем при помощи того или иного использования ударных волн".

И действительно, это время наступило очень скоро — уже с 1945 г. измерения ударной сжимаемости веществ при давлениях в несколько десятков ГПа стали проводиться в Лос-Аламосской национальной лаборатории, а в Российском федеральном ядерном центре (Арзамас-16) аналогичные планомерные работы независимо начались в 1948 г. ЯБ был одним из пионеров — основателей ударно-волнового направления. Сегодня максимальные давления, достигнутые в ударно-волновых экспериментах, в тысячу раз превосходят статические пределы.

При использовании динамических — ударно-волновых — методов исследователям приходится иметь дело с ситуациями, в которых в течение короткого времени происходит динамическое воздействие на вещество, сопровождающееся большими изменениями — градиентами — всех физических параметров, возникает движение среды и т.п. В общем виде эти процессы описываются уравнениями газовой динамики в частных производных, которые выражают законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{u} = 0, \quad \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \text{div } (\rho \mathbf{u} \times \mathbf{u} + \pi) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho (E + u^2/2)}{\partial t} + \text{div } \left[\rho \mathbf{u} \left(E + \frac{u^2}{2} \right) + \pi \mathbf{u} \right] = 0,$$

где $\partial/\partial t$ — обозначение локальной, т.е. относящейся к данной точке пространства, частной производной по времени, ρ — плотность вещества, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ — вектор скорости, $\pi = (\pi_{ik})$ — тензор напряжений². Система (1), которая замыкается уравнением состояния $E = E(p, \rho)$, как правило, решается численно.

Для случая автомодельного течения уравнения (1) упрощаются, и поэтому в динамическом эксперименте стремятся реализовать именно автомодельные режимы. Практически важным является случай стационарной ударной волны [4].

Ударная волна является особым физическим объектом с уникальными свойствами. При распространении по веществу стационарного ударного разрыва на его фронте выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии [4], которые связывают кинематические параметры — скорость ударной волны D и массовую скорость вещества за её фронтом u — с термодинамическими величинами — удельной внутренней энергией E , давлением p и удельным объёмом V — простыми

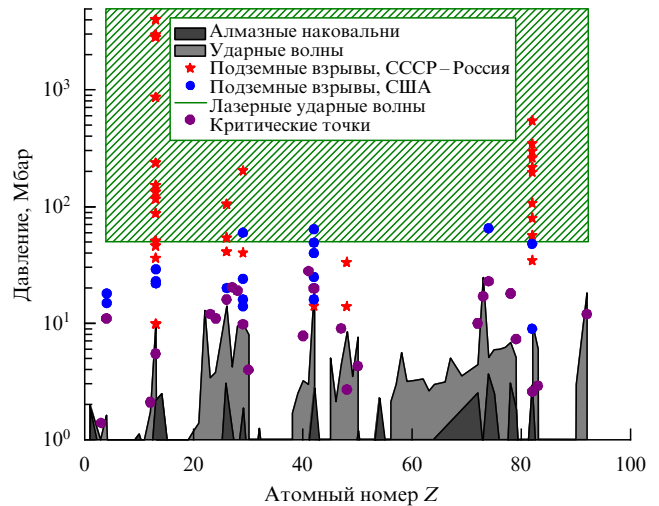


Рис. 1. Исследованная область давлений элементов. Статические давления — алмазные наковальни, динамические — ударные волны, подземные взрывы, лазерные ударные волны.

алгебраическими соотношениями:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{D - u}{D}, \quad p = p_0 + \frac{Du}{V_0}, \quad (2)$$

$$E = E_0 + \frac{1}{2} (p + p_0)(V_0 - V),$$

где индексом 0 отмечены параметры покоящегося вещества перед фронтом ударной волны. Уравнения (2), известные как законы Гюгоню, позволяют по регистрации любых двух из пяти параметров, E, p, V, D, u , характеризующих ударный разрыв, найти гидро- и термодинамические характеристики вещества. Наиболее просто и точно базисными методами измеряется скорость ударной волны D . Выбор второго измеряемого параметра зависит от конкретных условий эксперимента, а результатом измерений и применения уравнений (2) является калорическое УРС $E = E(p, V)$.

Другое важное автомодельное решение относится к случаю центрированной волны разрежения Римана [4]. В экспериментах по фиксации кривых изоэнтропического расширения ударно-сжатого вещества [23, 26] состояния в центрированной волне разгрузки описываются интегралами Римана [4]

$$V = V_H + \int_p^{p_H} \left(\frac{du}{dp} \right)^2 dp, \quad E = E_H - \int_p^{p_H} p \left(\frac{du}{dp} \right)^2 dp, \quad (3)$$

которые вычисляются вдоль измеренной изоэнтропы $p_s = p_s(u)$ (V_H, p_H и E_H — соответственно удельный объём, давление и внутренняя энергия исходного состояния на ударной адиабате). Проводя регистрации при различных начальных условиях и интенсивностях ударных волн, также можно определить калорическое УРС $E = E(p, V)$.

Методы измерений ударной сжимаемости веществ, проблемы генерации высоких и сверхвысоких давлений и увлекательная история вопроса подробно изложены в монографиях [4, 23, 26] и обзорах [6, 8–10, 40–49]. В указанных источниках подробно рассмотрены основные этапы развития физики высоких динамических давлений — от первых работ 1950-х годов, в которых с

¹ В физике высоких давлений наряду с единицами давлений системы СИ также применяются внесистемные единицы, в частности бар или атмосфера, 1 бар = 10⁵ Па = 0,987 атм.

² Отметим, что в гидродинамическом приближении тензор напряжений сферический: $\pi_{ik} = p \delta_{ik}$, δ_{ik} — символ Кронекера.

помощью взрывных генераторов были реализованы давления до 500 ГПа, до более поздних работ по созданию и изучению экстремальных состояний вещества при давлениях в несколько сотен ТПа, полученных с помощью мощных лазеров и в условиях подземных взрывов. Доступная на сегодняшний день шкала давлений показана на рис. 1. В этих работах реализован философский принцип одного из основоположников физики экстремальных состояний вещества, коллеги и друга ЯБ, Ю.Б. Харитона: "Мы должны знать в десять раз больше того, что требуется для решения практических задач". В разделе 3 мы подробно рассмотрим фундаментальные идеи ЯБ, реализация которых позволила заполнить белые пятна на физической картине фазовых состояний вещества.

3. Задача Ферми – Зельдовича. Построение термодинамически полного уравнения состояния по результатам динамических измерений

Типичная поверхность термодинамического потенциала $p(V, T)$ для алюминия показана на рис. 2. К 1950-м годам на этой поверхности была известна только линия основной ударной адиабаты H_1 при мегабарных давлениях. Достоверная экспериментальная или теоретическая информация о свойствах кристалла, жидкости или плазмы при высоких давлениях и температурах, положении фазовых границ плавления, испарения и критической точки отсутствовала. Строго говоря, и положение H_1 было достаточно условным.

Специфическая особенность динамических экспериментов, на основе которых строятся полумпирические

модели УРС, состоит в том, что опытные данные позволяют получить уравнение состояния вещества только в термодинамически неполном виде: $E = E(p, V)$, так как внутренняя энергия не является полным термодинамическим потенциалом по отношению к переменным p и V , поэтому для построения замкнутой термодинамики необходима дополнительная информация о температуре $T = T(p, V)$ [4] или энтропии $S = S(p, V)$, которая крайне существенна для разработки адекватных полумпирических уравнений состояния.

Дело в том, что динамические методы исследования [4] основаны на фиксации механических параметров гидродинамического движения, которые не дают информации о термических или энтропийных характеристиках ударно-сжатого вещества.

Динамические методы диагностики, основанные на общих законах сохранения, позволяют свести задачу определения калорического уравнения состояния $E = E(p, V)$ к измерению кинематических параметров движения ударных волн и контактных поверхностей, т.е. к регистрации расстояний и времён, что может быть выполнено с высокой точностью. Как мы отмечали, внутренняя энергия, однако, не является термодинамическим потенциалом по отношению к переменным p, V , и для построения замкнутой термодинамики системы необходима дополнительная зависимость температуры $T(p, V)$.

В оптически прозрачных изотропных средах (газы, ионные кристаллы и т.п.) температура измеряется совместно с другими параметрами ударного сжатия. Конденсированные среды, в первую очередь металлы, как правило, непрозрачны, так что световое излучение ударно-сжатой среды недоступно для регистрации.

В соответствии с предложением Э. Ферми [50] и Я.Б. Зельдовича [3] термодинамически полное уравнение состояния может быть построено непосредственно по результатам динамических измерений, без привлечения априорных соображений о свойствах и характере исследуемого вещества [23, 26], исходя из первого закона термодинамики и известной из эксперимента зависимости $E = E(p, V)$ (или более удобной функции $\gamma(p, V) = pV/E(p, V)$). Это приводит к линейному неоднородному дифференциальному уравнению для $T(p, V)$

$$\left[p + \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_p \right] \frac{\partial T}{\partial p} - \left(\frac{\partial E}{\partial p} \right)_V \frac{\partial T}{\partial V} = T, \quad (4)$$

решение которого строится методом характеристик:

$$\frac{\partial p}{\partial V} = \frac{p + (\partial E/\partial V)_p}{(\partial E/\partial p)_V}, \quad \frac{\partial T}{\partial V} = -\frac{T}{(\partial E/\partial p)_V}, \quad (5)$$

или

$$E = E_0 \exp \left(- \int_{V_0}^V \gamma(V, E) d \ln V \right), \quad (6)$$

$$T = T_0 \frac{pV}{p_0 V_0} \exp \left[- \int_{V_0}^V \left(\frac{\partial \ln \gamma(E, V)}{\partial \ln V} \right) d \ln V \right].$$

Уравнения (4)–(6) дополняются начальными условиями: температура задаётся в области малых плотностей, где возможен её надёжный теоретический расчёт (цезиевая плазма), либо она известна из статического эксперимента [23, 26].

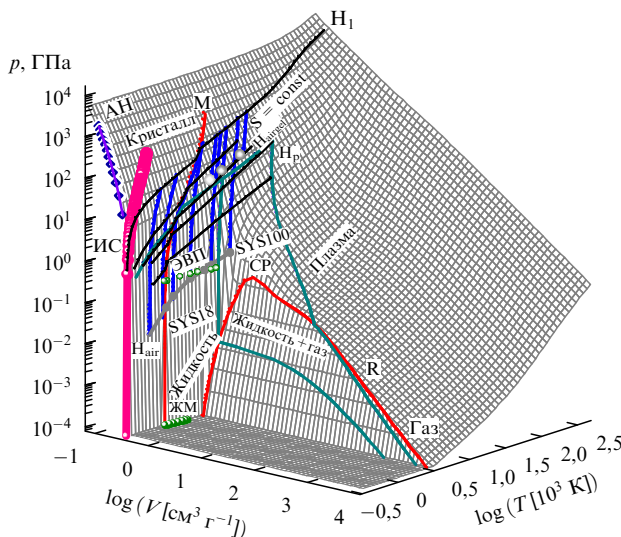


Рис. 2. Агрегатные состояния вещества. М — область плавления, R — граница двухфазной области жидкость–пар с критической точкой СР, H_1 и H_p — ударные адиабаты кристаллического и пористого алюминия; H_{air} и H_{airgel} — ударные адиабаты воздуха и аэрогеля, АН — измерения изотермической сжимаемости в алмазных наковальнях, ЖМ — измерения плотности жидкого металла при комнатном давлении, ИС — изэнтропическое сжатие, ЭВП — электровзрыв проводников — опыты по изобарическому расширению алюминиевых проволок, нагретых мощным импульсом тока, S — изэнтропы разгрузки, SIS18 и SIS100 — области, достижимые в экспериментах с пучками тяжёлых ионов на ускорителях SIS18 и SIS100.

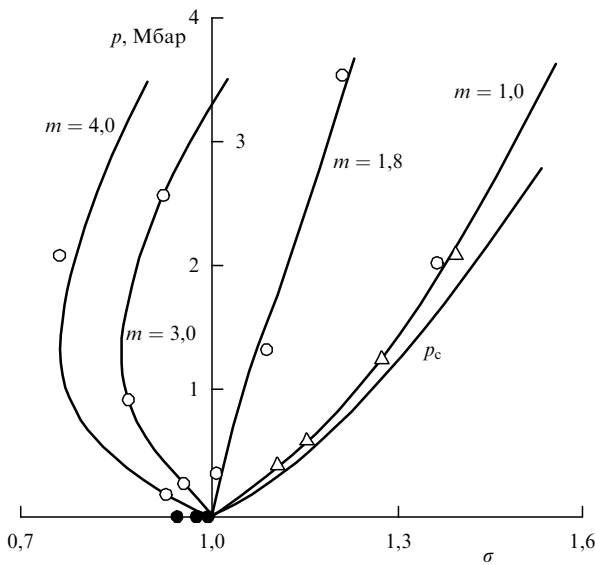


Рис. 3. Фазовая диаграмма вольфрама, согласно [51], в плоскости давление (p)–степень сжатия (σ), где $\sigma = V_0/V$, V_0 — удельный объём в нормальных условиях. Кривые — ударные адиабаты пористого металла при разных значениях степени пористости m , указанных около кривых ($m = V_{00}/V_0$, V_{00} — начальный удельный объём пористого вещества). p_c — кривая холодного сжатия. Различными символами показаны экспериментальные данные.

Необходимые для расчёта правых частей (5), (6) зависимости $E(p, V)$ определялись по экспериментальным данным в виде степенных полиномов

$$\sum_i \sum_j a_{ij} p^i V^j,$$

а для $\gamma(E, V)$ — в виде дробно-рациональных функций.

Определение точности полученного решения в зависимости от экспериментальных погрешностей и погрешностей начальных данных осуществлялось методом Монте-Карло посредством численного моделирования вероятностной структуры процесса измерения [23, 26].

Данный термодинамический метод носит общий характер — он свободен от ограничивающих предположений о свойствах, характере и фазовом составе исследуемой среды, поскольку основан на первых принципах механики сплошной среды: законах сохранения (2), (3) и основном термодинамическом тождестве (4). Эта термодинамическая универсальность дала возможность построить по единой методике уравнения состояния широкого спектра конденсированных сред, а также применить его для описания фазовых превращений [23, 26]. Особенно эффективным этот метод оказался для изучения термодинамики неидеальной плазмы цезия [23] на основе экспериментов по ударному и адиабатическому сжатию насыщенных паров металлов основной и переходной групп, ионных кристаллов, оксида кремния. Результаты расчёта такого рода для вольфрама представлены на рис. 3.

4. Ударное сжатие пористого вещества

В 1950-е годы ЯБ предложил экспериментально исследовать ударное сжатие одного и того же вещества при различных начальных плотностях [4]. В таком случае

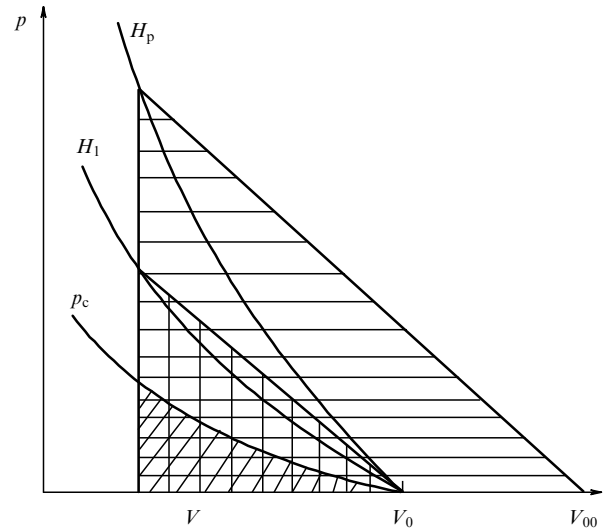


Рис. 4. Диаграмма давление–удельный объём ударного сжатия пористого вещества согласно [4]. H_p и H_1 — ударные адиабаты пористого и кристаллического вещества, p_c — кривая холодного сжатия. Горизонтальной штриховкой показана внутренняя энергия, приобретённая при ударном сжатии пористого вещества, вертикальной — при ударном сжатии кристалла, косой штриховкой — упругая энергия.

ударного сжатия пористого вещества — веер адиабат H_p — реализуется область фазовой диаграммы, отличная от основной ударной адиабаты H_1 и имеющая относительно неё пониженную плотность (см. рис. 2). Идея метода представлена на рис. 4. Из геометрического рассмотрения процесса ударного сжатия пористого образца физически понятно, что при сжатии до одного и того же конечного объёма V возрастание пористости вещества увеличивает тепловую часть энергии и, соответственно, тепловую компоненту давления.

ЯБ проанализировал также влияние тепловых эффектов на положение ударной адиабаты в фазовой плоскости и, исходя из простых физических соображений о виде УРС, теоретически получил эффект аномального ударного сжатия пористого вещества. Оказывается, что ударное сжатие вещества с низкой плотностью приводит к настолько большим величинам теплового давления, что плотность в конечном состоянии оказывается меньше нормальной. Данный эффект аномального хода ударной адиабаты был экспериментально подтверждён в первых же исследованиях ударной сжимаемости пористых металлов: вольфрама [52], алюминия, меди, никеля и свинца [53].

Выполненное впоследствии систематическое изучение ударных адиабат пористых веществ (см., например, работы [44, 54–68]) позволило получить референтную для построения широкодиапазонных УРС информацию и значительно расширило наши представления о термодинамических свойствах плотной жидкости и плазмы. Так, например, одновременно с получением данных о свойствах жидких металлов при мегабарных давлениях ударного сжатия [53] было построено полумпирическое УРС металлов с учётом переменной теплоёмкости атомов решётки и вклада электронов проводимости.

Следует отметить, что учёт эффектов ангармонизма тепловых колебаний атомов определялся отношением тепловой составляющей энергии к упругой и осуществлялся на основе данных по ударному сжатию пори-

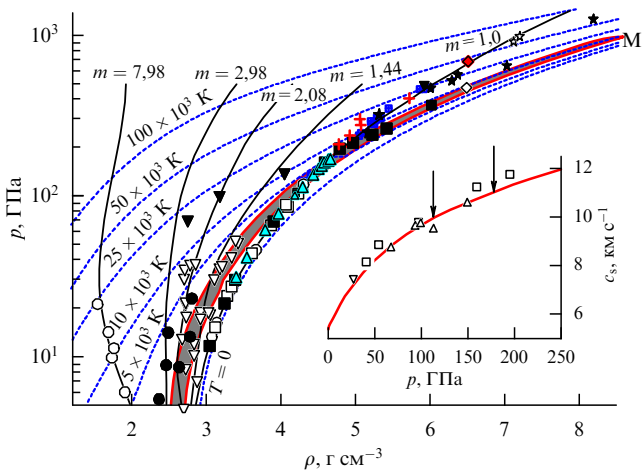


Рис. 5. Фазовая диаграмма алюминия при высоких давлениях. Результаты расчёта по УРС: изотермы (штриховые кривые) при температурах, указанных на рисунке, и ударные адиабаты пористых образцов (сплошные кривые) при значениях степени пористости m , указанных около кривых; М — область плавления. Символами показаны экспериментальные данные. На вставке — скорость звука $c_s(p)$ в ударно-сжатом алюминии: расчёт по УРС (кривая) и экспериментальные точки (символы); стрелки указывают положение плавления в ударной волне.

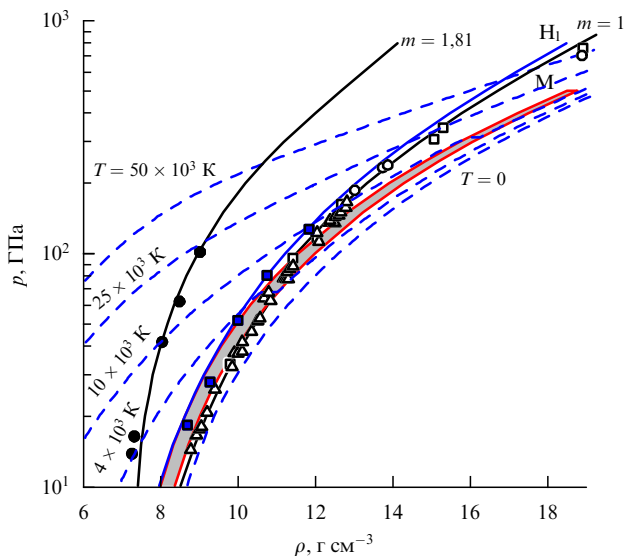


Рис. 6. Фазовая диаграмма олова при высоких давлениях. Расчёт по УРС: изотермы (штриховые кривые) при температурах, указанных на рисунке; ударные адиабаты пористых образцов (сплошные кривые) при значениях степени пористости $m = 1$ и 1,81; H_1 — ударная адиабата жидкого металла, М — область плавления. Символы — экспериментальные данные.

стого вещества. Рисунок 5 иллюстрирует качество расчёта фазовой диаграммы алюминия при высоких давлениях с помощью многофазного УРС [69].

Интересно сопоставить на фазовой диаграмме результаты измерений сжимаемости пористого вещества и нагретого до высокой температуры жидкого металла. Такие эксперименты были выполнены для легкоплавких металлов: цинка, олова, свинца, кадмия и висмута [70, 71]. Как видно из рис. 6, значительное увеличение начальной температуры позволяет исследовать область фазовой диаграммы, соответствующую сжатому жидкому веществу вблизи области плавления. Однако срав-

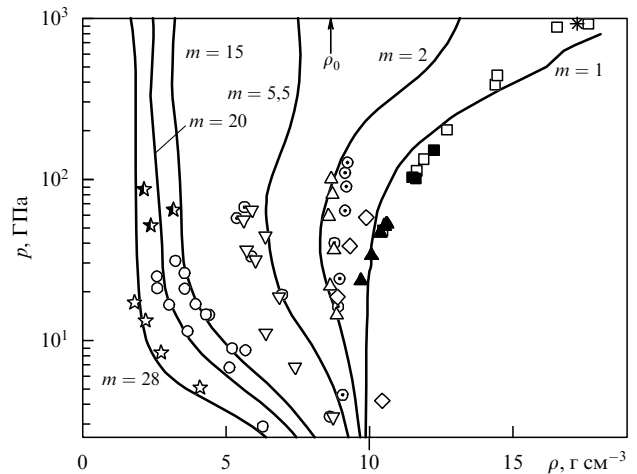


Рис. 7. Ударные адиабаты (сплошные кривые) пористого никеля — результат расчёта согласно химической модели плазмы [63]; $m = = V_{00}/V_0$. Символами показаны экспериментальные данные.

нение ударных адиабат жидкого и пористого металлов наглядно показывает преимущества идеи ЯБ — сжатие пористого вещества приводит к гораздо большим тепловым эффектам в давлении и энергии, что позволяет дальше отойти от основной ударной адиабаты и реализовать больший диапазон плотностей на фазовой диаграмме.

Уникальные результаты получены при исследовании ударной сжимаемости сильнопористого никеля — в работах [62, 63, 68] были исследованы ударные адиабаты образцов с начальной плотностью, в 10–28 раз меньшей, чем нормальная, при мегабарных давлениях. Конечные состояния ударного-сжатого никеля оказываются в диапазоне плотностей от 0,2 от нормальной и в области давлений до 90 ГПа, что соответствует высоким температурам, до 10^5 К. В таких условиях уже реализуются состояния не только плотной горячей жидкости, но и, согласно расчётам по химической модели плазмы [63], ионизованного металла со степенью ионизации $\alpha \leq 1$ и параметром кулоновской неидеальности $\Gamma = E_C/E_k$, где E_C — энергия межчастичного кулоновского взаимодействия, E_k — кинетическая энергия (рис. 7).

Совершенно особое место на фазовой диаграмме занимают уникальные данные измерений ударной сжимаемости пористых меди, железа и вольфрама с пористостью $m = 3–4$, полученные в условиях подземных ядерных взрывов [42, 56, 61]. В этих опытах конечная плотность на ударной адиабате близка к нормальной при экстремально высоких значениях давления (терапаскального диапазона) и температуры $\lesssim 3 \times 10^5$ К (рис. 8). Оценки показывают, что в экспериментах [42, 56, 61] реализованы состояния с доминирующим вкладом электронной компоненты, соответствующие слабыврожденному электронному газу с чрезвычайно высокой удельной концентрацией энергии, ~ 1 МДж $г^{-1}$.

Таким образом, воплощение идеи Я.Б. Зельдовича [4] позволило не только поставить реперные точки на фазовой диаграмме при более низких, чем на ударной адиабате кристалла, плотностях вещества, но и исследовать такие разные физические состояния, как плотная жидкость, неидеальная плазма и слабыврожденный электронный газ.

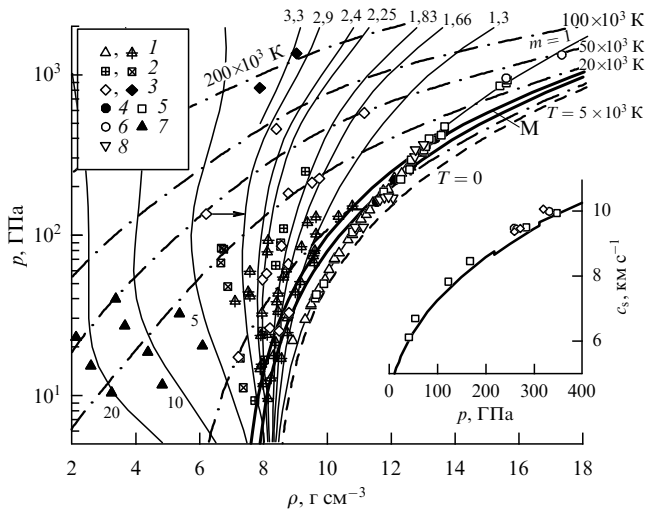


Рис. 8. Фазовая диаграмма железа при высоких давлениях. Расчёт по УРС: изотермы (штрихпунктирные кривые) и ударные адиабаты (сплошные кривые) пористых образцов при разных значениях степени пористости m , указанных на рисунке; М — область плавления. Символами показаны экспериментальные данные: 1–2, 5–8 — ударное сжатие с помощью химических ВВ, 3 — результаты [61] (светлые ромбы — ударное сжатие с помощью химических ВВ, тёмные — в условиях подземного взрыва). На вставке — скорость звука $c_s(p)$ в ударно-сжатом железе: расчёт по УРС (кривая) и экспериментальные точки (символы).

5. Изэнтропическое расширение ударно-сжатых веществ

Ещё в 1945–1948 годах американским и отечественным исследователям удалось экспериментально реализовать автомодельное течение в виде стационарной ударной волны, описываемой законами Гюгонио (2), и начать масштабные регистрации ударных адиабат веществ. В случае второго инварианта уравнений газовой динамики (4)–(6) — соотношений для центрированной волны разрежения Римана (3) — идея Я.Б. Зельдовича [3] была осуществлена значительно позднее. Сегодня можно указать две экспериментальные методики исследования УРС вещества при изэнтропическом расширении.

В первом случае в широком диапазоне давлений ударного сжатия определяются начальная и конечная точки на изэнтропах, т.е. на ударной адиабате и при расширении в преграду с фиксированной жёсткостью. Так, при расширении в воздух из различных давлений ударного сжатия были определены изэнтропы расширения свинца, алюминия, меди, железа, молибдена, тантала и углерода [59, 72–75]. Для свинца (рис. 9) ввиду наличия характерных немонотонностей зависимости скорости расширения в воздух от массовой скорости в ударно-сжатом веществе был сделан вывод об испарении в волне разгрузки при давлении выше 1,32 Мбар [72]. Для металлов с более высокими, чем у свинца, параметрами плавления и испарения изменение наклона на изэнтропах разгрузки (и, следовательно, эффект испарения) не наблюдается.

В качестве примера приведём результаты расчёта по широкодиапазонному УРС [69] изэнтропического расширения алюминия из твёрдой (изэнтропы S_1 – S_{14} на рис. 10) и жидкой (изэнтропы S_{15} – S_{31} на рис. 11) фаз при различных начальных давлениях ударного сжатия. Дей-

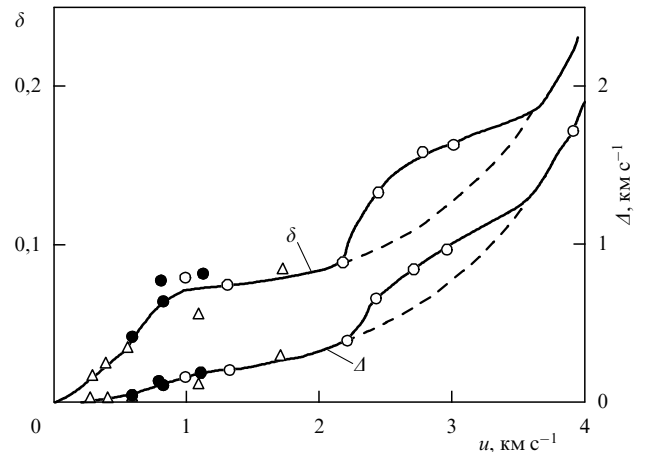


Рис. 9. Испарение свинца при разгрузке в воздух [72]. $\Delta = w - 2u$, $\delta = \Delta/2u$, где w и u — соответственно конечная и начальная скорости волны расширения (разгрузки в воздух и массовая скорость на ударной адиабате). Сплошные кривые соответствуют равновесному состоянию, штриховые — метастабильному. Символами показаны экспериментальные точки.

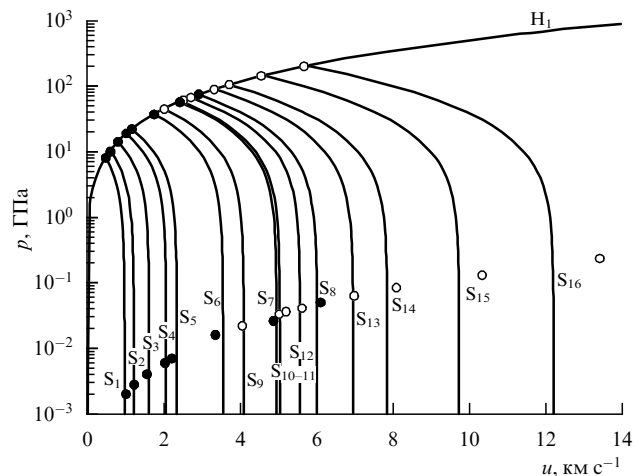


Рис. 10. Изэнтропы разгрузки твёрдого и расплавленного алюминия. Кривые — результаты расчёта по УРС, H_1 — основная ударная адиабата, S_i — изэнтропы разгрузки. Тёмные кружки — экспериментальные данные [74], светлые — [73].

ствительно, на энтропийной диаграмме (рис. 12) конечные состояния в волнах изэнтропического расширения (S_{1-31}) находятся выше положения области испарения и алюминий при разгрузке в воздух не испаряется, что видно также из рис. 2.

Отечественные исследователи разработали стандартные взрывные генераторы ударных волн различных типов [9, 43–46]. С их помощью метод изэнтропического расширения (3) реализуется в полном объёме в соответствии с идеей ЯБ [3]: для конкретной изэнтропы измеряются скорости разлёта при различных давлениях разгрузки $p_s = p_s(u)$. С этой целью в серии экспериментов определяются состояния вещества, возникающие при изэнтропическом расширении исследуемого образца из одной точки на ударной адиабате в преграды с различной жёсткостью. Уже в первых экспериментах, выполненных в такой постановке [57], были реализованы высокоэнергетические состояния меди и свинца в широком интервале параметров вблизи линии равновесия жидкость–

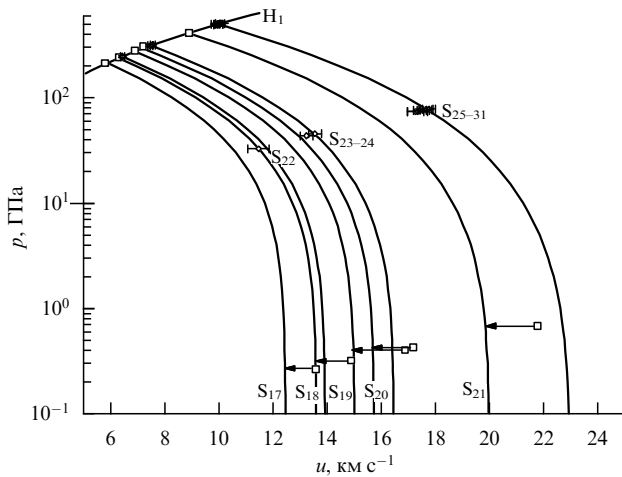


Рис. 11. Изоэнтропы разгрузки жидкого алюминия. Кривые — результаты расчёта по УРС: H_1 — основная ударная адиабата, S_i — изоэнтропы разгрузки. Экспериментальные данные: квадраты — [59], ромбы — разгрузка в аэрогель [76]. Стрелки указывают, к какой изоэнтропе относится экспериментальная точка.

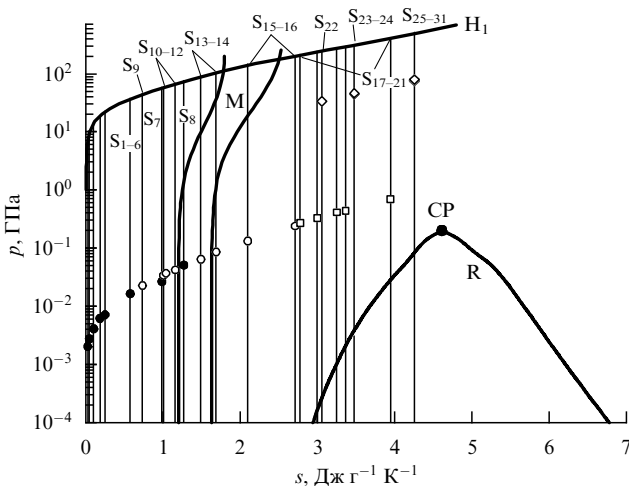


Рис. 12. Диаграмма давление (p) – энтропия (s) алюминия. Кривые — результаты расчёта по УРС: H_1 — основная ударная адиабата, S_i — изоэнтропы разгрузки; M — область плавления, R — двухфазная область жидкость – пар с критической точкой CP . Символы соответствуют экспериментальным точкам, показанным на рис. 10, 11.

пар, причём необходимое для этого большое значение энтропии в исходной точке на ударной адиабате и, соответственно, на изоэнтропе было получено за счёт использования пористых образцов. В качестве сред-преград применялись конденсированные материалы, такие как плексиглас, полиэтилен, пенопласты, а также воздух и инертные газы с известными УРС, находящиеся при различном начальном давлении.

Полученные данные охватили ранее не изученную область фазовой диаграммы: четыре порядка по давлению, три — по плотности и четыре — по температуре, от области горячей плотной жидкости, характеризующейся разупорядочиванием ионов и вырождением электронов, до областей неидеальной плазмы, испарения с критической точкой, квазиидеальной бoльцмановской плазмы и разреженного металлического пара.

По мере расширения в системе снимается вырождение электронов, происходит значительная перестройка

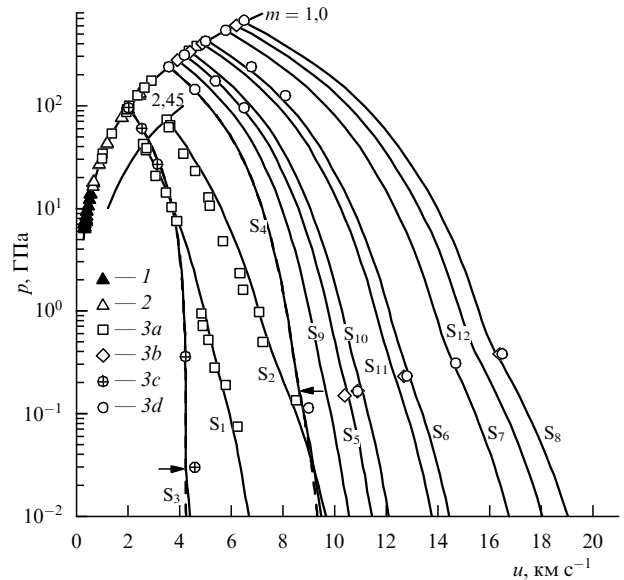


Рис. 13. Ударные адиабаты ($m = 1$ и $2,45$) и изоэнтропы разгрузки S_i (сплошные кривые — равновесные, штриховые — метастабильные) висмута. Стрелки указывают вхождение в двухфазную область жидкость – пар. Различными символами показаны экспериментальные результаты: точки 1 и 2 получены при ударном сжатии, точки 3a, 3c получены с помощью плоских генераторов ударных волн, 3b — многокаскадных, 3d — конических.

энергетического спектра атомов и ионов, осуществляется частичная рекомбинация плотной плазмы. В электронной неупорядоченной системе реализуется переход металл – диэлектрик и образуется неидеальная по отношению к различным видам межчастичного взаимодействия плазма в окрестности линии равновесия жидкость – пар и критической точки. Вхождение изоэнтроп в двухфазную область жидкость – пар сопровождается испарением, а со стороны газовой фазы — конденсацией, что приводит к изменению наклона экспериментальных зависимостей скорости волны разгрузки от давления.

Исследованный диапазон фазовой диаграммы был расширен в последующих экспериментах с алюминием, висмутом и медью [59, 77]. На рисунке 13 представлены данные по изоэнтропическому расширению висмута, а на рис. 14 — положения ударных адиабат и изоэнтроп на энтропийной диаграмме. Расчёты в рамках "химической" модели плазмы [23, 26, 78–80] показали, что конечные состояния на изоэнтропах S_2 , S_7 , S_8 и S_{12} соответствуют разреженной слабонеидеальной плазме со степенью ионизации $\alpha \approx 10^{-2} - 10^{-1}$. Равновесные свойства такой плазмы висмута рассчитываются с достаточно высокой степенью надёжности стандартными методами статистической физики, что позволяет на основе данных механических измерений [59] описать термодинамические свойства вещества и решить таким образом задачу Ферми – Зельдовича.

Альтернативная возможность замкнуть термодинамическое описание появляется, как видно из уравнения (6), если измерить температуру в волне изоэнтропической разгрузки. Следует отметить, что температурные измерения имеют самостоятельную ценность.

Рисунок 15 иллюстрирует сопоставление расчётных и экспериментальных изоэнтроп разгрузки свинца [81] в области испарения и окрестности критической точки. Как видно из рисунка, регистрация температуры в

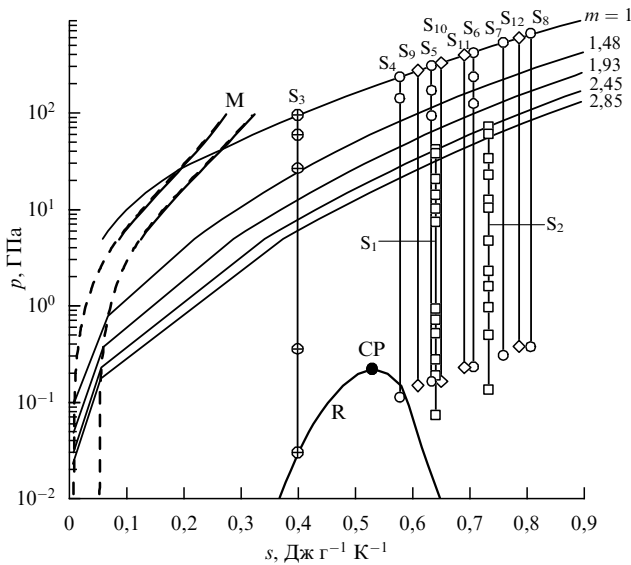


Рис. 14. Диаграмма давление (p) – энтропия (s) висмута. Результаты расчёта по УРС: изоэнтропы разгрузки S_i и ударные адиабаты при различных значениях пористости $m = V_{00}/V_0$, указанных около кривых, М — область плавления, R — двухфазная область с критической точкой CP. Символы соответствуют экспериментальным точкам, показанным на рис. 13.

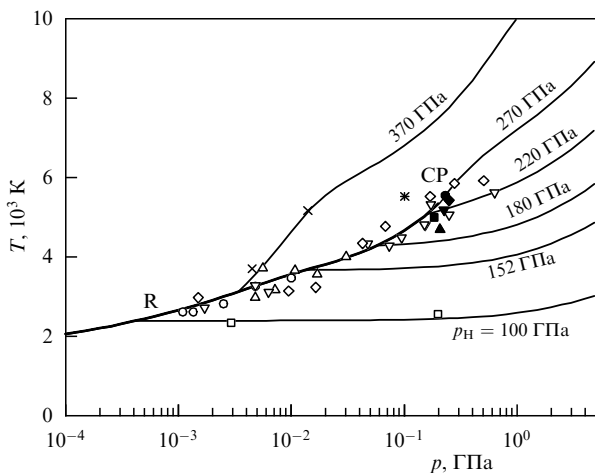


Рис. 15. Фазовая диаграмма давление – температура свинца. Кривые — результаты расчётов по УРС, R — область жидкость – пар с критической точкой CP, p_n — давление на ударной адиабате (около кривых указаны соответствующие значения). Светлыми символами показаны экспериментальные точки [81], тёмными — оценки критической точки.

волнах изоэнтропической разгрузки позволяет экспериментально определить положение области испарения во всём диапазоне температур вплоть до критической. Хорошее согласие результатов измерений при различных начальных давлениях ударного сжатия и, соответственно, при различных положениях вхождения изоэнтроп в двухфазную область жидкость – пар со стороны как жидкости, так и плазмы подтверждает этот факт.

Дальнейшие экспериментальные исследования с помощью метода изоэнтропического расширения ударно-сжатого вещества позволили получить референтные данные для построения УРС металлов [67, 74, 82–85] и органических соединений [86–88].

Идея ЯБ лежит также в основе метода изохорического нагрева интенсивными пучками тяжёлых ионов и

последующего изоэнтропического расширения (HINEX — Heavy Ion Heating and Expansion) [89, 90].

6. Модели уравнения состояния вещества

Современное состояние проблемы теоретического расчёта УРС вещества в широкой области фазовой диаграммы отражено в монографии [91]. Следует отметить, что, хотя в последние годы достигнут впечатляющий прогресс в расчётах отдельных областей фазовой диаграммы с помощью рафинированных методов функционала плотности и квантовой молекулярной динамики, по-прежнему остаётся нерешённой задача сквозного, в рамках одной теоретической методики, прохождения всей фазовой плоскости от области сжатого кристалла до области горячей жидкости, неидеальной плазмы и квазиидеальных газовых состояний. Поэтому на практике широко используются полумпирические модели УРС [69, 91–98], в которых термодинамический потенциал представляется в виде аналитической зависимости либо рассчитывается самосогласованным образом во всей фазовой плоскости. Функциональные зависимости в таких моделях, основанные на результатах строгих теорий, обеспечивают получение корректных физических асимптотик в различных предельных случаях. Численные коэффициенты частично представляют собой значения индивидуальных характеристик вещества, а частично — подгоночные коэффициенты, подбираемые из условий наилучшего соответствия результатов строгих теоретических расчётов совокупности экспериментальных данных. Методические требования, принципы построения и примеры расчёта УРС детально изложены в монографиях [91, 96, 98] и обзорах [69, 97, 99]. Мы проиллюстрируем предлагаемый подход на примере многофазного УРС молибдена.

Модель УРС, которая задаётся в виде термодинамического потенциала свободной энергии [69, 95, 97], учитывает вклады упругой компоненты при $T = 0$, атомов решётки и электронов проводимости, наиболее важные физические эффекты: ангармонизм тепловых колебаний атомов решётки, плавление, испарение и ионизацию. Основная часть коэффициентов уравнения состояния, которые являются характерными для каждого металла константами (атомный вес, заряд ядра, плотность в нормальных условиях и т.п.), берётся из справочников, остальные находятся из условий наилучшего описания наиболее существенных экспериментальных данных и воспроизведения асимптотик к результатам теоретических расчётов. Для построения уравнения состояния привлекается следующая информация при высоких давлениях и температурах: измерения изотермической сжимаемости в алмазных наковальнях, данные по плотности и скорости звука в жидких металлах, $p - T$ -измерения фазовых диаграмм в статических условиях, результаты исследований по изобарическому расширению, регистрации ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов в падающей и отражённой волнах, результаты исследований сравнительной ударной сжимаемости в подземных ядерных взрывах, данные по изоэнтропическому расширению ударно-сжатых металлов, оценки параметров критической точки. Кроме того, используются результаты расчётов по теории Томаса – Ферми, различным зонным теориям и с помощью метода квантовой молекулярной динамики.

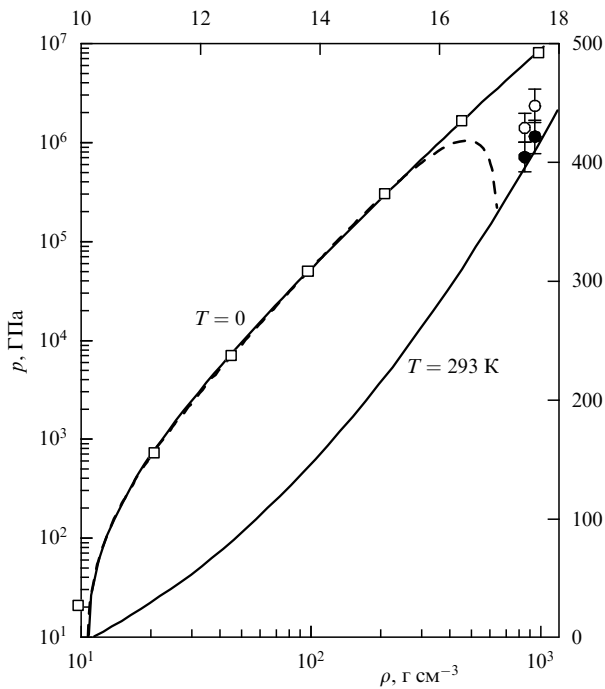


Рис. 16. Давление в молибдене при $T = 0$ (левая и нижняя оси координат) и $T = 293$ К (правая и верхняя оси координат). Сплошные кривые — расчёт по УРС, штриховая кривая — результат из [101]; квадраты — расчёт по теории Томаса–Ферми [100], кружки с погрешностями — сжатие в алмазных наковальнях без поправок (тёмные кружки) и с поправками (светлые кружки) на негидростатичность.

По результатам измерений статической и динамической сжимаемостей молибдена можно сделать вывод, что кривая давления имеет плавный монотонный характер. По этой причине УРС молибдена соответствует исходным параметрам объёмноцентрированной кубической фазы при комнатных условиях. Кривая упругого сжатия молибдена, как видно из рис. 16, хорошо согласуется с результатами расчётов по модели Томаса–Ферми [100] при сжатиях до 100-кратного, а при невысоких степенях сжатия — с более ранней полуэмпирической зависимостью [101]. Результаты измерений изотермической сжимаемости молибдена в алмазных наковальнях также находятся в согласии с теоретическими результатами в пределах ошибки эксперимента и обработки данных. Расчётное значение начального наклона кривой плавления $dT/dp = 3,33$ К кбар $^{-1}$ согласуется с результатами опытов по изобарическому расширению проводников, $dT/dp = 3,4 \pm 0,6$ К кбар $^{-1}$ [102], и оптимизационной обработки данных для твёрдого и жидкого молибдена $dT/dp = 3,5 \pm 0,2$ К кбар $^{-1}$ [103].

Область пониженных относительно плотности в случае ударной адиабаты кристаллического вещества плотностей изучена в опытах по ударному сжатию пористых образцов молибдена, а также жидкого нагретого до температуры 1673 К металла. В опытах по измерению скорости звука в ударно-сжатом молибдене [104] обнаружено исчезновение поперечной компоненты при $p = 3,9$ Мбар, что связывается с началом плавления в ударной волне. Фазовая диаграмма молибдена при высоких давлениях показана на рис. 17. Из анализа рис. 17 следует надёжность описания термодинамических свойств ударно-сжатого молибдена в исследован-

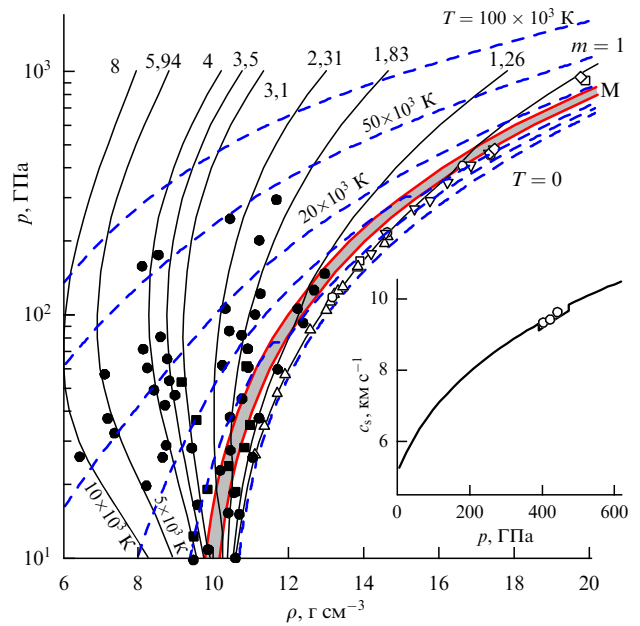


Рис. 17. Фазовая диаграмма молибдена при высоких давлениях. Расчёт по УРС: штриховые кривые — изотермы при разных температурах, сплошные кривые — ударные адиабаты пористых образцов при различных значениях пористости, указанных около кривых, М — область плавления. Символами показаны экспериментальные данные. На вставке — скорость звука $c_s(p)$ в ударно-сжатом алюминии: расчёт по УРС (кривая) и экспериментальные точки (символы).

ном диапазоне характеристик, а расчётная величина давления начала плавления $p = 3,85$ Мбар совпадает с результатом эксперимента [104]. Сравнение расчётной ударной адиабаты нагретого жидкого металла с данными [105] также показывает их хорошее согласие.

Измерения свойств молибдена в волнах изоэнтропической разгрузки проведено в работах [74, 106]. Результаты расчёта показывают, что в случае максимального реализованного давления ударного сжатия 2,3 Мбар кристаллического молибдена [74] изоэнтропа S_3 из области состояния горячего кристалла расширяется в двухфазную область жидкость–кристалл, а остальные две изоэнтропы (S_1 и S_2) целиком находятся в области твёрдой фазы. Как видно из рис. 18, результаты [74] с высокой точностью описываются построенным УРС молибдена. В опытах [106] благодаря использованию пористых образцов реализованы состояния жидкого металла с большей, чем в работе [74], энтропией. В расчёте изоэнтропы S_4 и S_5 при их входе в двухфазную область жидкость–пар испытывают изломы при давлениях 5,48 и 1,67 кбар, что в пределах экспериментальной погрешности хорошо согласуется с p - u -зависимостью [106].

В области пониженных плотностей и умеренных давлений для молибдена в серии работ [107–111] выполнены измерения термодинамических свойств в опытах по изобарическому расширению. Эти данные, как видно из рис. 19, отличаются друг от друга в пределах 20 % по температуре и 10 % по плотности, причём существенные различия результатов работ [107] и [111] видны даже в области твёрдой фазы. Разброс оценок критических точек также велик — находится в диапазоне плотностей и температур от 1 г см $^{-3}$ и 8000 К [112] до $3,1$ г см $^{-3}$ и 19720 К [106]. По-видимому, можно предположить нестационарность режима измерений в экспериментах

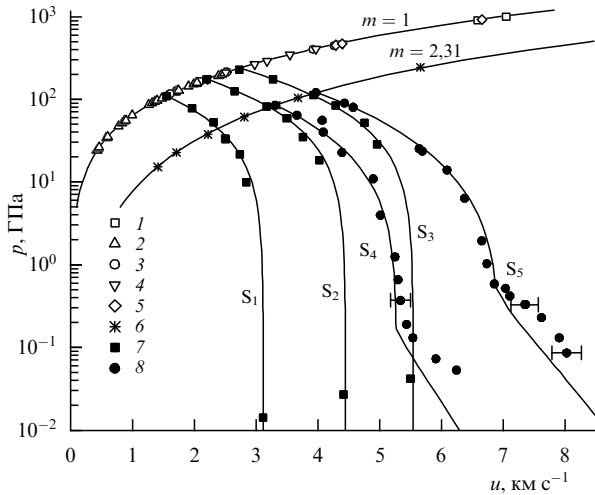


Рис. 18. Ударные адиабаты при $m = 1$ и $m = 2,31$ и изэнтропы разгрузки (S_i) молибдена. Символы 1–6 соответствуют ударному сжатию, 7 — результатам [74], 8 — изэнтропическому расширению [106].

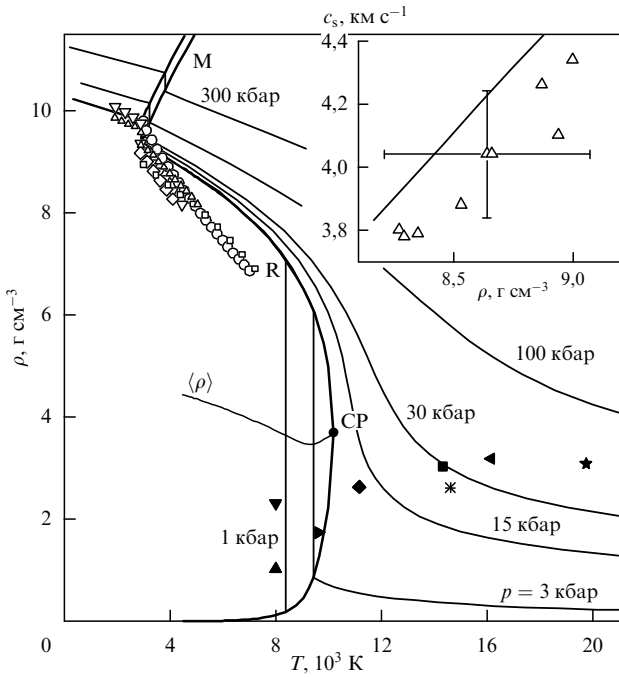


Рис. 19. Фазовая диаграмма молибдена в области пониженных плотностей. Тонкие сплошные кривые — изобары. М — плавление, R — испарение с критической точкой CP. Светлые символы — данные экспериментов по электровзрыву проводников, тёмные — оценки критической точки. На вставке — скорость звука в жидком молибдене при $p = 2$ кбар, треугольниками показаны экспериментальные точки.

[107–111], приводящую к завышению значения теплоёмкости и наклона экспериментальных изобар в переменных плотность–температура. Расчётное положение критической точки $p_c = 7,59$ кбар, $T_c = 10180$ К, $V_c = 0,271$ см³ г⁻¹, $s_c = 1,520$ Дж г⁻¹ К⁻¹ разумно согласуется с оценками [109, 113], а температура испарения $T_v = 4459$ К соответствует приведённому в справочнике [114] значению температуры 4973 К, известному с погрешностью 10%.

Построенное в рамках такого подхода УРС молибдена эффективно используется при численном моделиро-

вании широкого круга задач физики экстремальных состояний.

7. Заключение

В одной публикации невозможно отразить всю широту таланта и обаяние личности Я.Б. Зельдовича и его вклад в современную физику. Мы постарались показать влияние ЯБ и его идей на сравнительно узкую область — физику экстремальных состояний вещества. Видно, что фундаментальные идеи, предложенные ЯБ более 50 лет назад, развиваются и находятся в основе самых современных экспериментальных и теоретических исследований. Эта особенность творчества Я.Б. Зельдовича — доводить фундаментальные научные идеи до реального воплощения в экспериментах или практических приложениях — продолжается в работах его школы, его учеников и их учеников.

Нашей стране повезло с Яковом Борисовичем. "Отец" американской водородной бомбы Э. Теллер неоднократно говорил при встречах (и даже написал об этом в предисловии к книге по физике мегагауссных магнитных полей [12]), что для СССР удачей было то, что к моменту начала работ по ядерной бомбе в СССР были такие выдающиеся учёные, как Я.Б. Зельдович и Л.В. Альтшулер. А вот американскому ядерному проекту таких людей очень не хватало. Там имелись первоклассные специалисты по ядерной физике, но не было сильных "газодинамиков", в особенности таких, которые знали бы одновременно и ядерные, и газодинамические проблемы. Ту же мысль в беседе с В.Е.Ф. высказал Х. Бете, считавший самой серьёзной проблемой в создании американской ядерной бомбы именно газодинамическую часть и отсутствие на Западе соответствующих специалистов-газодинамиков.

Однажды на одной из Гордоновских конференций по высоким давлениям, развязав дискуссию на тему нецитирования одной из работ ЯБ по пористым адиабатам, В.Е.Ф. получил в ответ вполне откровенное признание



Фото 2. В Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау АН СССР в июне 1986 г. (слева направо): Норрис Киллер, Яков Борисович Зельдович и Владимир Евгеньевич Фортгов.

одного американца: "Что же делать? Придумаешь что-то стоящее, а оказывается, это уже сделал и опубликовал Зельдович!"

Так или иначе, но вот уже третье поколение открывает для себя обширное творчество ЯБ, к сожалению, не везде и не всем известное за рубежом (хотя во многих лабораториях книга Я.Б. Зельдовича и Ю.П. Райзера [4] и юбилейный двухтомник работ ЯБ [115, 116] лежат на самом видном месте). Тем не менее влияние ЯБ на ударно-волновую науку на Западе исключительно велико и плодотворно. Об этом прекрасно написал профессор Р.Н. Киилер (слева на фото 2) в статье "Размышления американского учёного о работе академика Я.Б. Зельдовича в области динамической физики высоких давлений" [38], отмечая, в частности, что "в богатом наследии академика Я.Б. Зельдовича — сильная и продуктивная исследовательская программа высоких динамических давлений в России".

Список литературы

1. Зельдович Я Б *Теория ударных волн и введение в газодинамику* (М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1946)
2. Зельдович Я Б, Компанец А С *Теория детонации* (М.: Гостехиздат, 1955) [Zeldovich Ia B, Kompaneets A S *Theory of Detonation* (New York: Academic Press, 1960)]
3. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **32** 1577 (1957) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **5** 1287 (1957)]
4. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Физматлит, 2008) [Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena* (Mineola, N.Y.: Dover Publ., 2002)]
5. Фортвов В Е *Экстремальные состояния вещества* (М.: Физматлит, 2009)
6. Альтшулер Л В *УФН* **85** 199 (1965) [Al'tshuler L V *Sov. Phys. Usp.* **8** 52 (1965)]
7. Fortov V E *Extreme States of Matter on Earth and in the Cosmos* (Berlin: Springer, 2011)
8. Альтшулер Л В, Баканова А А *УФН* **96** 193 (1968) [Al'tshuler L V, Bakanova A A *Sov. Phys. Usp.* **11** 678 (1969)]
9. Фортвов В Е *УФН* **177** 347 (2007) [Fortov V E *Phys. Usp.* **50** 333 (2007)]
10. Фортвов В Е *УФН* **179** 653 (2009) [Fortov V E *Phys. Usp.* **52** 615 (2009)]
11. Фортвов В Е *Физика высоких плотностей энергии* (М.: Физматлит, 2013)
12. Caldirola P, Knoepfel H (Eds) *Physics of High Energy Density* (New York: Academic Press, 1971)
13. Анисимов С И, Прохоров А М, Фортвов В Е *УФН* **142** 395 (1984) [Anisimov S I, Prokhorov A M, Fortov V E *Sov. Phys. Usp.* **27** 181 (1984)]
14. Фортвов В Е, Хоффманн Д, Шарков Б Ю *УФН* **178** 113 (2008) [Fortov V E, Hoffmann D N H, Sharkov B Yu *Phys. Usp.* **51** 109 (2008)]
15. Дудин С В и др. *ТВТ* **48** 3 (2010) [Dudin S V et al. *High Temp.* **48** 1 (2010)]
16. Landau L D, Zeldovich Ya B *Acta Physicochim. USSR* **18** 194 (1943); Ландау Л Д, Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **14** 32 (1944)
17. Фортвов В Е, Красников Ю Г *ЖЭТФ* **59** 1645 (1970) [Fortov V E, Krasnikov Yu G *Sov. Phys. JETP* **32** 897 (1971)]
18. Зельдович Я Б, Тодес О М *ЖЭТФ* **10** 1441 (1940); Zeldovich Ya B, Todes O M *Acta Physicochim. USSR* **16** (1/2) 26 (1942)
19. Dzyabura V, Zaghou M, Silvera I F *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** 8040 (2013)
20. Фортвов В Е и др. *ЖЭТФ* **124** 288 (2003) [Fortov V E et al. *JETP* **97** 259 (2003)]
21. Fortov V E, Mintsev V B *Phys. Rev. Lett.* **111** 125004 (2013)
22. Рубаков В А *УФН* **182** 1017 (2012) [Rubakov V A *Phys. Usp.* **55** 949 (2012)]
23. Фортвов В Е, Храпак А Г, Якубов И Т *Физика неидеальной плазмы* (М.: Физматлит, 2004)
24. Henderson D (Ed.) *Frontiers in High Energy Density Physics* (Washington, D.C.: National Academies Press, 2003)
25. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Статистическая физика Ч. 1* (М.: Физматлит, 2001) [Landau L D, Lifshitz E M *Statistical Physics Vol. 1* (Oxford: Pergamon Press, 1980)]
26. Fortov V E, Iakubov I T, Khrapak A G *Physics of Strongly Coupled Plasma* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2006)
27. Гинзбург В Л *УФН* **174** 1240 (2004) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **47** 1155 (2004)]
28. Hemley R J, Ashcroft N W *Phys. Today* **51** (8) 26 (1998)
29. Засов А В, Постнов К А *Общая астрофизика* (Фрязино: Век 2, 2006)
30. Drake R P *High-Energy-Density Physics: Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics* (Berlin: Springer, 2006)
31. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008) [Shatskii A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)]
32. Потехин А Ю *УФН* **180** 1279 (2010) [Potekhin A Yu *Phys. Usp.* **53** 1235 (2010)]
33. Шакура Н И и др. *УФН* **183** 337 (2013) [Shakura N I et al. *Phys. Usp.* **56** 321 (2013)]
34. Бескин В С, Истомина Я Н, Филиппов А А *УФН* **183** 179 (2013) [Beskin V S, Istomina Ya N, Philippov A A *Phys. Usp.* **56** 164 (2013)]
35. Бабичев Е О, Докучаев В И, Ерошенко Ю Н *УФН* **183** 1257 (2013) [Babichev E O, Dokuchaev V I, Eroshenko Yu N *Phys. Usp.* **56** 1155 (2013)]
36. Bridgman P W *Rev. Mod. Phys.* **18** 1 (1946) [Бриджмен П *УФН* **31** 53 (1947); *УФН* **31** 210 (1947); *УФН* **31** 346 (1947)]
37. Раковский А В *УФН* **1** 39 (1918); *УФН* **1** 108 (1918); *УФН* **1** 182 (1918)
38. Киилер Р Н *УФН* **165** 595 (1995) [Keeler R N *Phys. Usp.* **38** 559 (1995)]
39. Bridgman P W, in *Solids under Pressure* (Eds W Paul, D M Warschauer) (New York: McGraw-Hill, 1963) [Бриджмен П, в сб. *Твердые тела под высоким давлением* (Под ред. В Пола, Д Варшауэра) (М.: Мир, 1966) с. 11]
40. Альтшулер Л В, Зельдович Я Б, Стыжкин Ю М *УФН* **167** 107 (1997) [Al'tshuler L V, Zel'dovich Ya B, Styazhkin Yu M *Phys. Usp.* **40** 101 (1997)]
41. Забабахин Е И *УФН* **85** 721 (1965) [Zababakhin E I *Sov. Phys. Usp.* **8** 295 (1965)]
42. Трунин Р Ф *УФН* **164** 1215 (1994) [Trunin R F *Phys. Usp.* **37** 1123 (1994)]
43. Альтшулер Л В и др. *УФН* **166** 575 (1996) [Al'tshuler L V et al. *Phys. Usp.* **39** 539 (1996)]
44. Фунтиков А И *УФН* **167** 1119 (1997) [Funtikov A I *Phys. Usp.* **40** 1067 (1997)]
45. Альтшулер Л В и др. *УФН* **169** 323 (1999) [Al'tshuler L V et al. *Phys. Usp.* **42** 261 (1999)]
46. Трунин Р Ф *УФН* **171** 387 (2001) [Trunin R F *Phys. Usp.* **44** 371 (2001)]
47. Ильяев Р И *УФН* **181** 405 (2011) [Ilkaev R I *Phys. Usp.* **54** 387 (2011)]
48. Трунин Р Ф *УФН* **181** 416 (2011) [Trunin R F *Phys. Usp.* **54** 397 (2011)]
49. Подурец А М *УФН* **181** 427 (2011) [Podurets A M *Phys. Usp.* **54** 408 (2011)]
50. Fermi E *Rend. Accad. Naz. Lincei* **6** 602 (1927)
51. Фортвов В Е *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (6) 156 (1972) [Fortov V E *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **13** 894 (1972)]
52. 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)]
53. Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **42** 686 (1962) [Kormer S B et al. *Sov. Phys. JETP* **15** 477 (1962)]
54. Алексеев Ю П, Ратников В П, Рыбаков А П *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (2) 101 (1971) [Aleksseev Yu L, Ratnikov V P, Rybakov A P *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **12** 257 (1971)]
55. Баканова А А, Дудолодов И П, Сутулов Ю Н *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (2) 117 (1974) [Bakanova A A, Dudoladov I P, Sutulov Yu N *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **15** 241 (1974)]
56. Зубарев В Н и др., в сб. *Детонация* (Отв. ред. А Н Дремин) (Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978) с. 61
57. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **78** 741 (1980) [Al'tshuler L V et al. *Sov. Phys. JETP* **51** 373 (1980)]
58. Жерноклетов М В, Зубарев В Н, Сутулов Ю Н *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (1) 119 (1984) [Zhernokletov M V, Zubarev V N, Sutulov Yu N *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **25** 107 (1984)]
59. Глушак Б Л и др. *ЖЭТФ* **96** 1301 (1989) [Glushak B L et al. *Sov. Phys. JETP* **69** 739 (1989)]

60. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **96** 1024 (1989) [Trunin R F et al. *Sov. Phys. JETP* **69** 580 (1989)]
61. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **95** 631 (1989) [Trunin R F et al. *Sov. Phys. JETP* **68** 356 (1989)]
62. Трунин Р Ф, Симаков Г В *ЖЭТФ* **103** 2180 (1993) [Trunin R F, Simakov G V *JETP* **76** 1090 (1993)]
63. Грязнов В К и др. *ЖЭТФ* **114** 1242 (1998) [Gryaznov V K et al. *JETP* **87** 678 (1998)]
64. Бушман А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **58** 640 (1993) [Bushman et al. *JETP Lett.* **58** 620 (1993)]
65. Фунтиков А И *ТВТ* **36** 406 (1998) [Funtikov A I *High Temp.* **36** 384 (1998)]
66. Трунин Р Ф, Панов Н В *ТВТ* **38** 754 (2000) [Trunin R F, Panov N V *High Temp.* **38** 728 (2000)]
67. Гударенко Л Ф и др. *ТВТ* **38** 437 (2000) [Gudarenko L F et al. *High Temp.* **38** 413 (2000)]
68. Трунин Р Ф, Симаков Г В, Панов Н В *ТВТ* **39** 430 (2001) [Trunin R F, Simakov G V, Panov N V *High Temp.* **39** 401 (2001)]
69. Lomonosov I V *Laser Part. Beams* **25** 567 (2007)
70. Волков К В, Сибилев В А *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (4) 125 (1981) [Volkov K V, Sibilev V A *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **22** 551 (1981)]
71. Трунин Р Ф и др. *ТВТ* **33** 222 (1995)
72. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **73** 1866 (1977) [Al'tshuler L V et al. *Sov. Phys. JETP* **46** 980 (1977)]
73. Баканова А А и др. *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (2) 76 (1983) [Bakanova A A et al. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **24** 204 (1983)]
74. Жерноклетов М В и др. *ТВТ* **33** 40 (1995)
75. Трунин Р Ф и др. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ* (Под ред. Р Ф Трунина) (Саров: РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2001)
76. Knudson M D, Asay J R, Deeney C J. *Appl. Phys.* **97** 073514 (2005)
77. Квитов С В и др. *Письма в ЖЭТФ* **53** 338 (1991) [Kvitov S V et al. *JETP Lett.* **53** 353 (1991)]
78. Грязнов В К и др. *ЖЭТФ* **78** 573 (1980) [Gryaznov V K et al. *Sov. Phys. JETP* **51** 288 (1980)]
79. Грязнов В К, Иосилевский И Л, Фортвов В Е *Письма в ЖЭТФ* **22** 1376 (1982)
80. Грязнов В К, Фортвов В Е *ТВТ* **25** 1208 (1987)
81. Агеев В Г и др. *Письма в ЖЭТФ* **48** 608 (1988) [Ageev V G et al. *JETP Lett.* **48** 659 (1988)]
82. Жерноклетов М В *ТВТ* **36** 231 (1998) [Zhernokletov M V *High Temp.* **36** 214 (1998)]
83. Кулиш М И и др. *Письма в ЖЭТФ* **94** 105 (2011) [Kulish et al. *JETP Lett.* **94** 101 (2011)]
84. Ternovoi V Ya et al. *AIP Conf. Proc.* **505** 189 (2000)
85. Khishchenko K V et al. *High Temp. High Press.* **37** 291 (2008)
86. Бушман А В и др. *Докл. РАН* **329** 581 (1993) [Bushman A V et al. *Phys. Dokl.* **38** 165 (1993)]
87. Бушман А В и др. *ЖЭТФ* **109** 1662 (1996) [Bushman A V et al. *JETP* **82** 895 (1996)]
88. Хищенко К В, Жерноклетов М В, Ломоносов И В, Сутулов Ю Н *ЖТФ* **75** (2) 57 (2005) [Khishchenko K V, Zhernokletov M V, Lomonosov I V, Sutulov Yu N *Tech. Phys.* **50** 197 (2005)]
89. Hoffmann D H H et al. *Phys. Plasmas* **9** 3651 (2002)
90. Фортвов В Е, Шарков Б Ю, Штокер Х УФН **182** 621 (2012) [Fortov V E, Sharkov B Yu, Stöcker H *Phys. Usp.* **55** 582 (2012)]
91. Фортвов В Е *Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы* (М.: Физматлит, 2012)
92. Kerley G I *Int. J. Impact Eng.* **5** 441 (1987)
93. More R M et al. *Phys. Fluids* **31** 3059 (1988)
94. Young D A, Corey E M J. *Appl. Phys.* **78** 3748 (1995)
95. Bushman A V, Kanel G I, Ni A L, Fortov V E *Thermophysics and Dynamics of Intense Pulse Loadings* (London: Taylor & Francis, 1993)
96. Бушман А В, Ломоносов И В, Фортвов В Е *Уравнения состояния металлов при высоких плотностях энергии* (Черноголовка: ИХФЧ РАН, 1992)
97. Fortov V E, Lomonosov I V *Pure Appl. Chem.* **69** 893 (1997)
98. Валько В В и др., в кн. *Физика ядерного взрыва Т. 2 Действие взрыва* (М.: Физматлит, 2010) с. 140
99. Fortov V E, Lomonosov I V *Open Plasma Phys. J.* **3** 122 (2010)
100. Калиткин Н Н, Кузьмина Л В, Препринт № 35 (М.: ИПМ АН СССР, 1975)
101. Кормер С Б, Урлин В Д, Попова Л Т *ФТТ* **3** 2131 (1961) [Kormer S B, Urlin V D, Popova L T *Sov. Phys. Solid State* **3** 1547 (1962)]
102. Gathers G R, Shaner J W, Hodson W M *High Temp. High Press.* **11** 529 (1979)
103. Guilletmet F A *Int. J. Thermophys.* **6** 367 (1985)
104. Hixson R S et al. *Phys. Rev. Lett.* **62** 637 (1989)
105. Duffy T S, Ahrens T J J. *Appl. Phys.* **76** 835 (1994)
106. Жерноклетов М В, Медведев А Б, Симаков Г В *Хим. физика* **14** (2–3) 49 (1995)
107. Shaner J W, Gathers R G, Minichino C *High Temp. High Press.* **9** 331 (1977)
108. Seydel U, Kitzel W J. *Phys. F Met. Phys.* **9** L153 (1979)
109. Gathers G R *Int. J. Thermophys.* **4** 209 (1983)
110. Pottlacher G, Kaschnitz E, Jager H J. *Phys. Condens. Matter* **3** 5783 (1991)
111. Hixson R S, Winkler M A *Int. J. Thermophys.* **13** 477 (1992)
112. Young D, Report UCRL-52352 (Livermore: Lawrence Livermore Lab., 1977)
113. Seydel U, Fucke W J. *Phys. F Met. Phys.* **8** L157 (1978)
114. Кикоин И К (Ред.) *Таблицы физических величин* Справочник (М.: Атомиздат, 1976)
115. Зельдович Я Б *Химическая физика и гидродинамика: Избранные труды* (Под ред. Ю Б Харитона) (М.: Наука, 1984) [Zeldovich Ya B *Chemical Physics and Hydrodynamics: Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich* (Eds J P Ostriker, G I Barenblatt, R A Sunyaev) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1993)]
116. Зельдович Я Б *Частицы, ядра, Вселенная: Избранные труды* (Под ред. Ю Б Харитона) (М.: Наука, 1985) [Zeldovich Ya B *Particles, Nuclei, and the Universe: Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich* (Eds J P Ostriker, G I Barenblatt, R A Sunyaev) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1993)]

Ya.B. Zeldovich and equation of state problems for matter under extreme conditions

V.E. Fortov

Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 14, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: fortov@ras.ru

I.V. Lomonosov

Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Akademika Semenova 1, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation
E-mail: ivl143@icp.ac.ru
Tomsk State University, prosp. Lenina 36, 634050 Tomsk, Russian Federation

In the amazing range of Yakov Borisovich Zeldovich's research interests—from general problems of chemical physics, kinetics, combustion, detonation, and shock waves to elementary particles and cosmology—the physics of matter under extreme conditions occupies a special position. This paper reviews some of Ya. B.'s work on shock waves and equations of state of matter. Among Ya. B.'s basic ideas are the use of shock data to develop thermodynamically complete equations of state; shock compression of porous matter; and the adiabatic expansion of shock-compressed materials. The widespread use and development of these ideas as tools for extreme conditions studies are illustrated with examples.

PACS numbers: **01.60.+q**, **62.50.-p**, **64.10.+h**, **64.30.-t**, **65.40.-b**

Bibliography — 116 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (3) 231–245 (2014)

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403b.0231

Received 22 November 2013, revised 23 December 2013

Physics—Uspekhi **57** (3) (2014)