

03;05;12

Ударно-волновое сжатие конденсированных изотопов водорода при мегабарных давлениях

© Р.Ф. Трунин,¹ Г.В. Борисков, А.И. Быков, Р.И. Илькаев, Г.В. Симаков, В.Д. Урлин, А.Н. Шуйкин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: root@gdd.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 17 октября 2005 г.)

С помощью взрывных устройств сферической геометрии, в которых стальной ударник разгоняется до 23 km/s получены экспериментальные данные по ударному сжатию твердого водорода (протия) до максимальных давлений в 66 GPa и дейтерия (жидкой и твердой исходных фаз) до 123 GPa. Результаты сравниваются с данными американских исследователей, полученными для жидкого дейтерия и протия с использованием традиционных энергетических источников взрывчатых веществ и легкогазовых пушек), на установке по разгону ударника сверхсильным магнитным полем (Z-установка лаборатории Sandia) и лазерной установке NOVA (лаборатория Livermore). За исключением данных, полученных на NOVA, все результаты согласуются между собой.

PACS: 82.30.Rs, 62.50.+p

Введение

Поведение водорода в условиях воздействия на него экстремально высоких давлений и температур представляет постоянный интерес для исследователей. Причин здесь несколько. Пожалуй, главная из них — получение физически обоснованного уравнения состояния водорода, основанного на совокупности экспериментальных данных, относящихся к различным областям его фазовой диаграммы, что позволит более надежно судить о строении планет Солнечной системы, прогнозировать состояние сильно сжатой высокотемпературной плазмы водорода в проблеме управляемого термоядерного синтеза и в решении комплексных производственных задач.

Казалось, что водород, являющийся простейшей структурой среди многообразия остального мира, допускает проведение прямых расчетов высокоплотных и высокотемпературных состояний. К сожалению, до сих пор нет расчетных моделей, адекватно описывающих совокупность состояний водорода во всех областях изменения его термодинамических характеристик. Более того, результаты модельных представлений расходятся между собой, что прежде всего объясняется трудностями однозначного учета сильного межчастичного взаимодействия, сложностью эффектов вырождения в сильно неидеальной плазме, а также некоторыми другими факторами.

В этих условиях создание широкодиапазонных уравнений состояния изотопов водорода не только не потеряло своей актуальности, но и увеличило свое значение. А получение в качестве тестовых надежных экспериментальных данных по сжатию дейтерия и протия в условиях мегабарных давлений становится необходимым для проверки любых модельных представлений.

С экспериментами в области высоких плотностей и температур ударного сжатия связываются определен-

ные надежды и на получение металлического водорода (кандидата в высокотемпературные сверхпроводники) — глобальную задачу физики высоких плотностей энергии.

Первые измерения ударного сжатия жидкого протия выполнены в США и относятся к 1966 г. [1]. Затем последовали публикации 1980 и 1983 гг. [2,3]. Максимальные параметры в этих работах соответствовали давлениям ~ 10 GPa. К середине 1970-х—началу 1980-х гг. относятся публикации американских исследователей по дейтерию [2–4]. Диапазон их измерений не превышал 23 GPa. В измерениях исследовался жидкий дейтерий.

По ряду обстоятельств¹ исследования ударного сжатия изотопов водорода в России не проводились. Их начало относится лишь к концу 1998 г. Незадолго до этого группа ливерморских ученых в США [6,7] провела эксперименты с жидким дейтерием на лазерной установке NOVA, и при давлении выше 40 GPa, обнаружила аномальное сжатие, при котором плотность дейтерия увеличивалась с 0.6 до примерно 1 g/cm³. Первые результаты исследований [6] приведены на рис. 1. Там же даны расчетные адиабаты жидкого дейтерия по одному из УРС нашего института [8] и уравнению из библиотеки производственных УРС SESAME [9] (США). Видно прежде всего значительное несоответствие расчетов и эксперимента в области давлений, превышающих 30 GPa. Да и сами расчетные кривые заметно отличаются друг от друга. (На рис. 1 приведена также кривая из [6], построенная по предложенной в [10] модели).

За последние годы P – ρ -плоскость этого рисунка заполнилась многочисленными данными, полученными

¹ Считалось, в частности, что существующих экспериментальных данных по водороду, включая пионерскую работу по его изэнтропическому сжатию [5], было достаточно для построения его уравнения состояния (УРС).

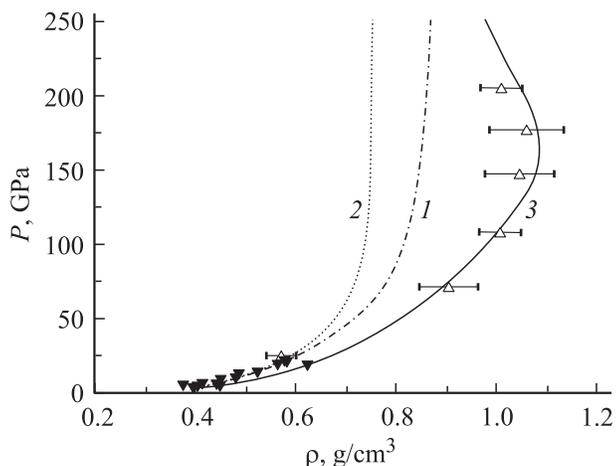


Рис. 1. Данные по ударному сжатию жидкого дейтерия, имевшиеся в 1998 г. Эксперимент: ▼ — [2–4], △ — [6]. Расчет: 1 — [8], 2 — [9], 3 — [6,10].

как американскими, так и российскими исследователями. В конце 1990-х гг. это была стартовая позиция для начала наших исследований.

Из-за необычности данные NOVA вызвали немалые сомнения в своей справедливости как у нас в стране, так и за рубежом. В частности, возникали вопросы относительно точности определения массовых скоростей, предельного сжатия дейтерия (6 вместо характерных значений, равных 4–5).

Высказывалось предположение [11], что возможной причиной резкого возрастания плотности в исследованиях [6,7] могло быть нестрогое соблюдение геометрии между направлением распространения ударной волны, созданной лазерным пучком, и перпендикулярным ему направлением рентгенографической регистрации волновых параметров в дейтерии. Это могло привести к завышению массовой скорости и, как следствие, к увеличению сжатия. Еще одной из причин, как указывалось в наших предыдущих публикациях [12,13], могло быть влияние на результаты [6,7] возможной „неравновесности“ состояний, возникающих на границе дейтерий–алюминий: при толщине образцов на NOVA в 0.2 mm такие состояния могут сказываться на получаемых результатах. Были и другие сомнения относительно справедливости данных, полученных на NOVA.

Поэтому было решено проверить американские данные в прямых опытах с жидким дейтерием в сопоставимой с [6,7] областью давлений. Эта была первая задача на стадии начала работ. Наши исследования жидкого дейтерия при содействии Б. Неллиса были поддержаны руководством Ливерморской лаборатории.

Для оценки „масштаба бедствия“, с которым предстояло иметь дело, рассмотрим значения кинематических параметров, непосредственно следующих из эксперимента, — волновую и массовую скорости — D и U . Из сопоставления в $D-U$ координатах данных [6,7] с экстраполяцией ударной адиабаты жидкого дейтерия

из [2–4] (результаты которых не вызывают сомнений) следует, что при $D \approx 25$ km/s ($P \approx 90$ GPa) зависимости отстоят друг от друга примерно на 8% по массовым скоростям. Чтобы показать справедливость того или иного результата, ошибка наших измерений должна была „уложиться“ в этот интервал (т. е. быть значительно меньше 8%).

При существующей точности регистраций, определяемой, в основном, асимметрией ударной волны, эта задача достаточно трудна, и был определенный риск — при большой погрешности определения скоростей — не дать однозначного ответа на поставленный вопрос. Это обстоятельство заставило нас запланировать получение в сравнимом диапазоне скоростей (давлений) не одной точки на ударной адиабате, а двух–трех. Более того, в процессе проведения работ оказалось желательным и возможным получить адиабаты не только обеих фаз дейтерия — жидкой и твердой, но и твердой фазы протия. При таком объеме исследований была уверенность, что поставленный вопрос о проверке данных NOVA будет решен.

Получение достоверных данных об ударном сжатии изотопов водорода является существенным и для построения уравнения состояния этого элемента. Это была вторая, но не менее важная задача исследований. Результатом работы явилось получение трех ударных адиабат: жидкого и твердого дейтерия до давлений в 109 и 123 GPa соответственно и твердого протия до давления в 66 GPa.

Примерно одновременно с нами проверку данных NOVA на жидком дейтерии начали американские исследователи из лаборатории Sandia. Для создания необходимых давлений они использовали установку, в которой с помощью сильного магнитного поля осуществляется разгон тонкой металлической пластинки до различных скоростей, обеспечивающих получение в дейтерии давлений вплоть до мегабара. Результаты их исследований [14,15] хорошо согласуются с нашими данными.

Выбор и характеристика измерительных устройств

С точки зрения независимой проверки данных NOVA было желательно провести ее на устройствах, отличных от тех, в основе которых лежат лазерные способы создания ударных полн, т. е. с помощью источников принципиально другого типа. Из возможных полностью подходили для подобной работы существующие у нас сферические устройства, так называемые „мягкие“ заряды, МЗ [16]. Оценки показали, что на них могут быть получены результаты, эквивалентные по давлениям данным NOVA.

Общую схему этих измерительных устройств можно видеть на рис. 2, а. Полусферический заряд взрывчатого вещества (ВВ) одновременно инициируется по всей поверхности с помощью специальной линзовой системы.

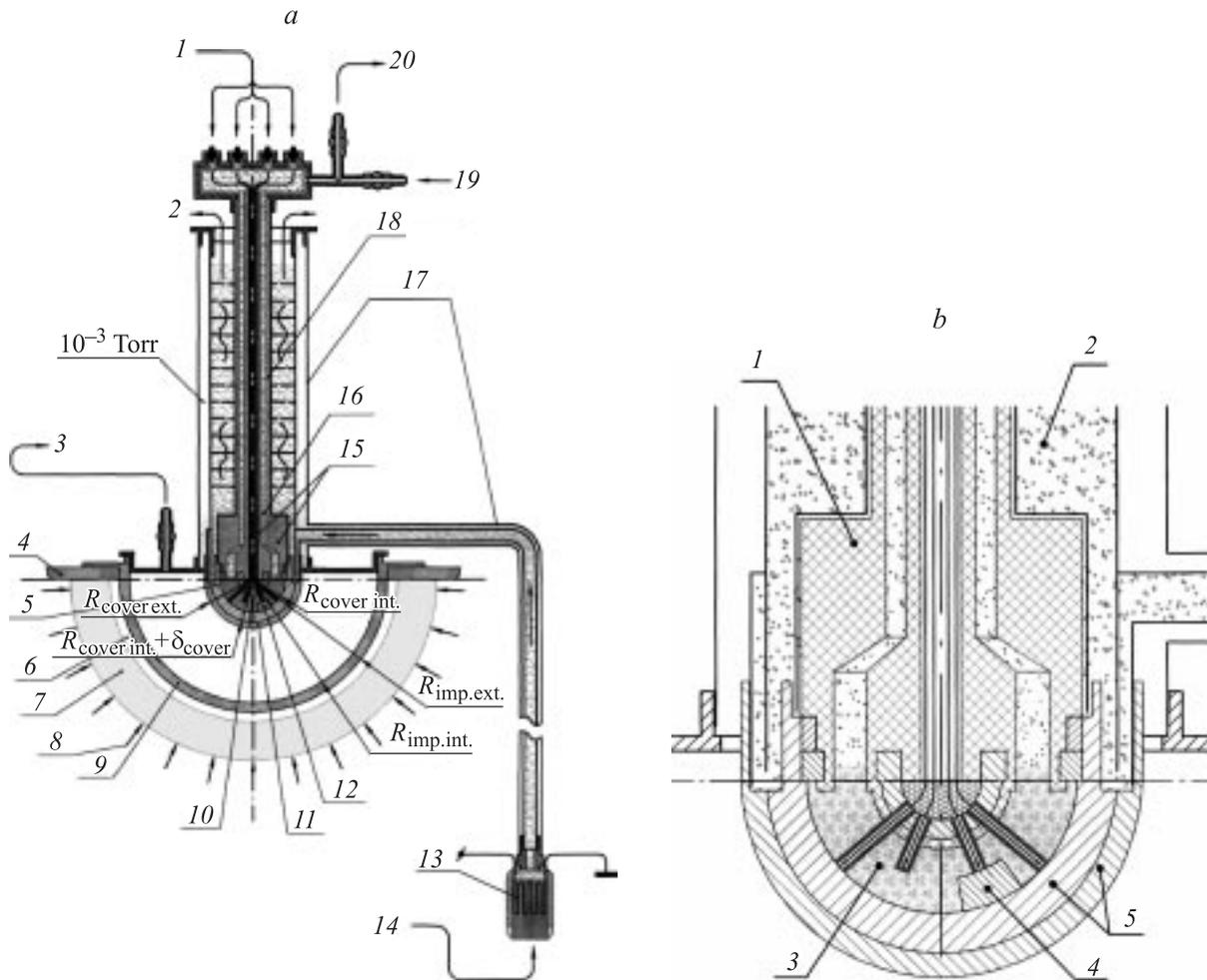


Рис. 2. Схема экспериментального устройства. *a* — общий вид: 1 — ввод датчиков, 2 — выход паров хладагента, 3 — откачка до 10^{-3} Torr, 4 — плита, 5 — внутренний слой экрана (Al), 6 — воздушный зазор, 7 — заряд ВВ, 8 — инициирование, 9 — лайнер ударник (Ст-3), 10 — дейтерий (конденсат), 11 — внешний слой экрана (Al), 12 — эталон (Al), 13 — нагреватель, 14 — подача хладагента (гелий), 15 — термоизолятор (тефлон), 16 — дейтерий (газ), 17 — криопровод, 18 — криоконтейнер, 19 — напуск газа, 20 — предварительная откачка до 10^{-3} – 10^{-2} Torr. *b* — центральная часть: 1 — термоизолятор (фторопласт), 2 — хладагент (He), 3 — конденсат (D_2 или H_2), 4 — эталон (Al), 5 — экран (Al).

Возникшие при этом продукты взрыва детонационной волны, расширяясь через небольшой воздушный промежуток, плавно разгоняют оболочку-ударник, выполненную из малоуглеродистой стали марки Ст-3. По мере схождения к центру скорость оболочки непрерывно возрастает и на малых радиусах достигает > 20 km/s, что соответствует необходимым давлениям в дейтерии и протии.

Исследуемый образец располагается, в соответствии с требованиями метода отражения [17], за экраном из эталонного вещества. В качестве экрана в наших исследованиях мог использоваться только алюминий — единственный из металлов, уравнение состояния которого известно достаточно полно и адиабата которого расположена относительно близко к адиабатам изотопов водорода.

Из существующих конструкций зарядов (а всего разработано около десяти разновидностей) были выбраны

три: МЗ-4, МЗ-8 и МЗ-18 [16]. В качестве ударника используется стальная полусферическая оболочка-ударник. В зарядах МЗ-4 и МЗ-8 она расположена на радиусе $R_{imp.ext} = 77$ mm, а ее толщина $\Delta_{imp} = 3.08$ mm.

Для МЗ-4: внешний радиус экрана $R_{cover} = 35$ mm, толщина двуслойного экрана $\Delta_{cover} = 4$ mm ($1 + 3$ mm), измерительный радиус $R_m = 29$ mm, база измерений (толщина образца) $S = 4$ mm. В наших опытах $S = R_2 - R_1$, $R_m = (R_2 + R_1)/2$, здесь R_2 и R_1 — внешний и внутренний радиусы эталонного и исследуемого образцов соответственно, при этом R_2 совпадает с внутренним радиусом экрана.

Для МЗ-8: $R_{cover} = 24.1$ mm, $\Delta_{cover} = 4.5$ mm ($1.5 + 3$ mm), $R_m = 17.6$ mm, $S = 4$ mm.

Для МЗ-18: $R_{imp.ext} = 130$ mm, $\Delta_{imp} = 3$ mm, $R_{cover} = 23$ mm, $\Delta_{cover} = 6.5$ mm ($2.5 + 4$ mm), $R_m = 14.5$ mm, $S = 4$ mm. Радиус ВВ в этом заряде в 1.4 раза превосходит радиус предыдущих двух.

Оценки параметров сжатия в жидком дейтерии показали, что на заряде МЗ-4 будут получены состояния, отвечающие давлению около 28 ГПа. Измерения должны соответствовать первому участку адиабаты жидкого дейтерия, полученному в США задолго до экспериментов на NOVA с использованием обычных способов создания давления с помощью ВВ и двухкаскадных легкогазовых пушек [2–4]. Эти данные отвечают нормальному положению адиабаты жидкого дейтерия и не вызывают никаких сомнений, поскольку многократно, на различных материалах и устройствах, прошли взаимную „международную“ проверку. Поэтому измерения в этой области давлений нужны для формального подтверждения их соответствия данным [2–4], в частности, для доказательства правильности учета эффектов (см. ниже), связанных с нестационарностью сходящихся волн. Положение двух других точек — на зарядах МЗ-8 и МЗ-18 — должно соответствовать давлениям около 60 и 110 ГПа и располагаться уже в области проверяемых результатов измерений на NOVA.

Было решено провести опыты на зарядах МЗ-8 и МЗ-18 с твердым дейтерием (один опыт позднее проведен на заряде МЗ-4); ожидаемые давления в них примерно те же, что и для жидкой фазы.

С твердым протием планировалось провести три серии опытов на всех рассмотренных зарядах. Ожидаемые давления в них соответственно должны составлять около 18, 30 и 65 ГПа.

Отметим главное преимущество систем МЗ перед американскими установками — сравнительно большая толщина исследуемых образцов (\approx в 20 раз больше, чем у образцов, использованных в [6,7]). Это практически снимает вопросы по поводу „неравновесности“ состояний на границе раздела алюминиевый экран—исследуемое вещество.

Специфика измерений

Использование сферических систем и проведение измерений со сверхлегкими веществами, какими являются изотопы водорода, связано с некоторыми специфическими особенностями. Отметим некоторые из них.

1) Отличие средней скорости $D_{av} = S/\Delta t$, фиксируемой в экспериментах, от локальной („мгновенной“) скорости волны на измерительном радиусе $D_{loc} = D(R_m)$. Их разница, т.е. $\Delta D_1 = D_{loc} - D_{av}$, находится из сопоставления средней и локальной скоростей из соответствующей расчетной зависимости прохождения волны в реальной геометрии устройства с последующим учетом этого отличия в экспериментальной величине скорости. Для Al и D₂ эта величина оказалась пренебрежимо мала по абсолютному значению. Для H₂ она была несколько большей, но, как правило, не превышала десятых долей процента.

2) Несовпадение радиуса измерений волновых скоростей с радиусом границы раздела алюминиевый

экран—исследуемое вещество. Дело в том, что сопоставление параметров эталонного (Al) и исследуемого вещества (D₂ или H₂) должно проводиться на границе их раздела („на разрыве“), где в обоих веществах выполняется условие равенства давлений и массовых скоростей. Нам же известны параметры проходящей волны в эталонном алюминии и дейтерии (протии) на радиусе R_m , отличающемся от радиуса контактной границы на величину $S/2$, где S — толщина образца. Поэтому следующее уточнение связано с „переносом“ действительной границы раздела водород—экран на радиус R_m . Соответствующая поправка ΔD_2 вводится в экспериментальную величину D из расчетного сопоставления скоростей в исследуемом веществе в действительной геометрии проведения опытов и измененной, когда граница водород—экран перемещена на R_m .

3) Остановимся еще на одном важном вопросе, касающемся интерпретации экспериментальных данных. Речь идет об изэнтропе расширения алюминия из состояний, реализуемых в нем на R_m . Напомним, что искомые состояния в дейтерии (протии) определяются точкой пересечения этой изэнтропы с волновым лучом $\rho_0 D$ дейтерия. Изэнтропы Al рассчитываются по его уравнению состояния; их положения, в зависимости от типа уравнения, могут заметно отличаться друг от друга. Вопрос состоит в том, какое уравнение состояния алюминия, а их существует несколько, следует использовать для расчета этих изэнтроп? Другими словами — какому из существующих УРС следует отдать предпочтение?

На рис. 3 проведено сопоставление пяти изэнтроп, рассчитанных по уравнениям, наиболее полно отвечающим совокупности экспериментальных данных. Это — уравнение Урлина [18], построенное по общепринятой схеме, содержащей „холодные“ и „теплые“ (включая электронные) составляющие в давлении и энергии, Медведева [19] (модифицированная жидкостная модель Вандер-Ваальса), Сапожникова [20], УРС которого является дальнейшим развитием уравнения Урлина, уравнение

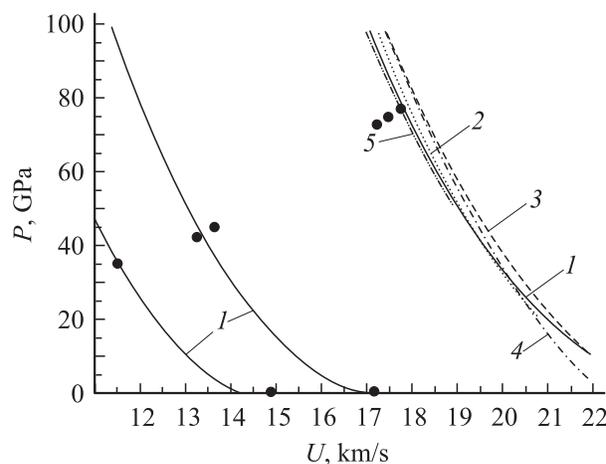


Рис. 3. Изэнтропы расширения алюминия: ● — экспериментальные данные [15,23]. Расчет: 1 — [18], 2 — [19], 3 — [20], 4 — [21], 5 — [22].

Гударенко [21] (вариант этого УРС используется в производственном счете) и, наконец, уравнение Керлея [22], применяемое американскими исследователями в аналогичной процедуре при изучении дейтерия. Все они примерно одинаково и вполне удовлетворительно описывают ударную адиабату алюминия.

К сожалению, кроме нее, экспериментальных данных по тестированию параметров УРС алюминия в интересующей нас области $P-U$ -диаграммы очень мало. Известны три экспериментальные точки, полученные американскими исследователями на изэнтропах расширения Al из состояний на ударной адиабате в 500, 300 и 240 ГПа [14] до давлений, определяемых положением ударной адиабаты низкоплотного аэрогеля (75, 42 и 35 ГПа). Известны также параметры нескольких точек на изэнтропах алюминия при его расширении в воздух [23].

Точки из [15], характеризующиеся различными исходными параметрами в Al, приведены на рис. 3. Сравнение изэнтроп проводилось при исходных состояниях в алюминии, взятых при одинаковом давлении. При близком описании ударной адиабаты алюминия всеми уравнениями имеется достаточно большое различие между положением изэнтроп. Так, при исходном давлении в алюминии $P = 750$ ГПа, максимальная разница в массовой скорости U на уровне давлений в 110 ГПа составляет около 3% (для изэнтроп Керлея и Сапожникова U равна 17.7 и 18.3 км/с соответственно). При этом среднее значение массовой скорости равно 18.0 км/с. На первый взгляд отсюда следует, что ввиду близости значений U при нахождении массовых скоростей в дейтерии можно пользоваться усредненными параметрами приведенных уравнений. На самом деле это не совсем так. Естественно, что главным в этом отборе УРС является соответствие расчета и эксперимента. При одинаковом описании ударной адиабаты алюминия критерием выбора становятся данные по разгрузке алюминия в аэрогель и воздух. При этом наибольший интерес представляет для нас аэрогель, поскольку параметры его экспериментальных точек не сильно отличаются от параметров в дейтерии (заметим, что американские исследователи используют эти параметры для калибровки положения своей изэнтропы). Что касается воздуха, то наши УРС не совсем адекватно описывают состояния при малых давлениях и могут использоваться лишь для оценок положения изэнтроп. К тому же эти состояния не реализуются в наших экспериментах.

Как следует из рис. 3, наиболее близко экспериментальным данным по аэрогелю соответствует изэнтропа расширения по уравнению Урлина [18]. Параметры этого УРС были откорректированы по современным данным, относящимся к ударной адиабате Al [23]. Изэнтропа из состояния с $P = 500$ ГПа проходит непосредственно по границе экспериментальных точек аэрогеля. Две другие изэнтропы, построенные по этому же уравнению из исходных состояний с $P = 300$ и 240 ГПа, также хорошо соответствуют эксперименту. Качественное соответствие имеется между расчетными изэнтропами [18]

и экспериментальными данными по расширению алюминия в воздух, приведенными в [23].

При выборе уравнения состояния алюминия обращалось также внимание на то, что изэнтропа алюминия по Урлину практически совпадает с положением изэнтропы Керлея, что приводит к достаточно однозначному сопоставлению наших экспериментальных результатов и данных [15].

Отметим, что ненамного отличается от максимальных параметров аэрогельных точек и изэнтропа Медведева. При исходных состояниях на адиабате алюминия в 720 ГПа (максимальные параметры в наших измерениях) в области давлений 65 и 115 ГПа, где соответственно зафиксированы максимальные параметры сжатия протия и дейтерия, отличия в положениях изэнтроп по уравнениям [18] и [19] составляют около 1% по скоростям.

По совокупности данных окончательно было выбрано откорректированное уравнение состояния [18]. Параметры сжатия изотопов водорода, полученные с использованием других уравнений состояния, будут в разной степени отличаться от тех, что приведены в настоящей работе. Однако эти отличия не изменяют выводов относительно ошибочности данных, полученных на установке NOVA.

С выбранным УРС алюминия рассчитывалось положение его ударной адиабаты, отвечающей низкотемпературным состояниям, и все изэнтропы расширения. С ним же проводилось и большинство необходимых газодинамических расчетов движения ударных волн в реальной геометрии используемых зарядов.

4) Наконец, укажем на еще одну особенность измерений на системах МЗ. Асимметрия схождения ударных волн в исследуемом образце в зоне независимых регистраций опыта (таких зон в каждом опыте три — см. следующий раздел) составляет около 50 ns при общей асимметрии в зоне измерений ≤ 100 ns и при фиксируемых временных интервалах в 140–270 ns обязательно требует для получения корректных результатов проведения серии из 3–5 опытов для каждой экспериментальной точки.

Постановка измерений

Выбор датчиков и их расположение при регистрации ударных волн

В работе использовались электроконтактные датчики, представляющие собой бифилярно свитую медную проволочку, покрытую изоляционным слоем лака (толщиной 10 μm). Начальный виток этой проводочки и является рабочей точкой датчика. Последний с целью строгой фиксации в пространстве помещается в миниатюрную ($\varnothing \leq 0.8$ mm) никелевую трубку, и на него подается напряжение 300–500 V; вторым электродом служит заземленный корпус трубки. Ударная волна, подходя к датчику-проволочке, разрушает его изоляционный слой. Происходит электрический пробой, и на временной шкале экрана осциллографа фиксируется соответствующая временная метка. Простота и надежность работы такого

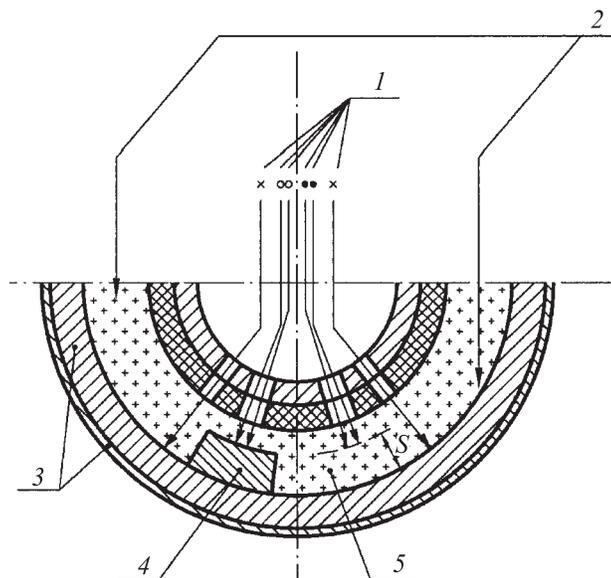


Рис. 4. Схема расположения исследуемых образцов и датчиков в измерительной ячейке: 1 — датчики, 2 — термометры, 3 — экран (Al), 4 — эталон, 5 — исследуемое вещество.

датчика, применяемого в практике динамических измерений в течение десятилетий, явилась главной причиной его выбора. Учитывалось также и то обстоятельство, что в прежних измерениях параметров ударных волн на выбранных зарядах использовались именно эти электроконтактные датчики. Естественно, были проведены специальные испытания, связанные с проверкой их работоспособности в условиях низких гелиевых температур. Эту проверку датчики выдержали. Заключительные испытания состояли в проведении прямых опытов по определению сжимаемости жидкого азота на одном из „плоских“ измерительных устройств. Датчики размещались непосредственно в азоте и полностью подтвердили свою работоспособность.

При исследовании сжатия изотопов водорода, в основном, использовалась так называемая „пробочная“ схема (рис. 4), когда под экраном симметрично относительно вертикали устанавливаются три исследуемых образца-пробки. Это — традиционная схема расположения образцов в „полусферических“ (и „плоских“) опытах, с ее использованием проведено подавляющее большинство опытов [23]. Она имеет следующие преимущества перед другими способами расположения образцов (например, в форме сегмента или полной полусферы).

Во-первых, экономичность схемы: вместо одного образца можно (что в большинстве случаев и делалось) исследовать сразу три, что в 2–3 раза эффективнее опытов с одиночными образцами.

Во-вторых, такая схема автоматически приводит к необходимости симметричного расположения (относительно вертикальной оси экспериментального устройства) и самих пробок и электроконтактных датчиков, что в целом, при осевой симметрии заряда, ставит в равные условия все три образца в опыте.

В-третьих, во многих случаях параметры в экранах, особенно на легких веществах и, в частности, на алюминии, ранее определялись именно в „пробочном“ варианте расположения образцов и контактов. Поэтому в целях сохранения преемственности (с точки зрения исходных состояний) было желательно если не полное копирование геометрии измерительного узла (диаметры пробок, угол их расположения и т.п.), то по крайней мере, сохранение геометрии близкой к ранее используемой.

На заряде МЗ-18 состояния в алюминиевом экране прежде не определялись. Их предстояло найти. Было естественно совместить эти измерения с регистрацией скоростей непосредственно в дейтерии. Это можно было сделать только в пробочном варианте расположения образцов — в противном случае потребовалось бы проведение удвоенного числа опытов.

Экспериментальное время прохождения ударной волны по каждому образцу находилось как разность Δt показаний датчика, стоящего на образце (верхний контакт), и усредненных показаний 4-х датчиков, стоящих на экране и расположенных вокруг образца (нижние контакты).

Несколько слов о „защите“ электроконтактных датчиков. Верхние датчики, расположенные в дейтерии, для надежного замыкания прикрывались алюминиевыми колпачками с толщиной дна $\cong 0.3$ мм. Для нижних датчиков „колпачком“ является сам алюминиевый экран. Естественно, что при обработке результатов учитывалось время прохождения ударной волны по дну колпачка.

Схема регистрации сигналов

Приведем здесь принципиальную электрическую схему регистраций моментов прихода ударной волны к границам раздела веществ (рис. 5), здесь $K1, K2$ — контакты первого и второго уровней; $C1, D, R2$ — элементы цепи формирования импульса на резисторе $R3$ при замыкании контакта; Z — выносной кабель между аппаратурой лабораторной комнаты и взрывным экспериментальным устройством; $R1, R4, R5$ — зарядные резисторы; I — индикатор целостности кабельных линий и контактов; $R6, R7, R8$ — нагрузка кабельной линии; $C1, C3$ — проходные конденсаторы.

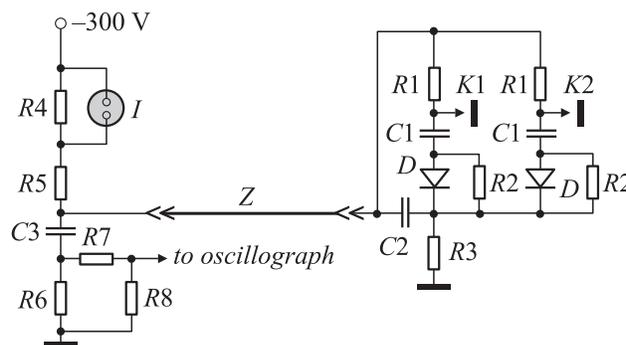


Рис. 5. Электрическая схема регистрации временных интервалов.

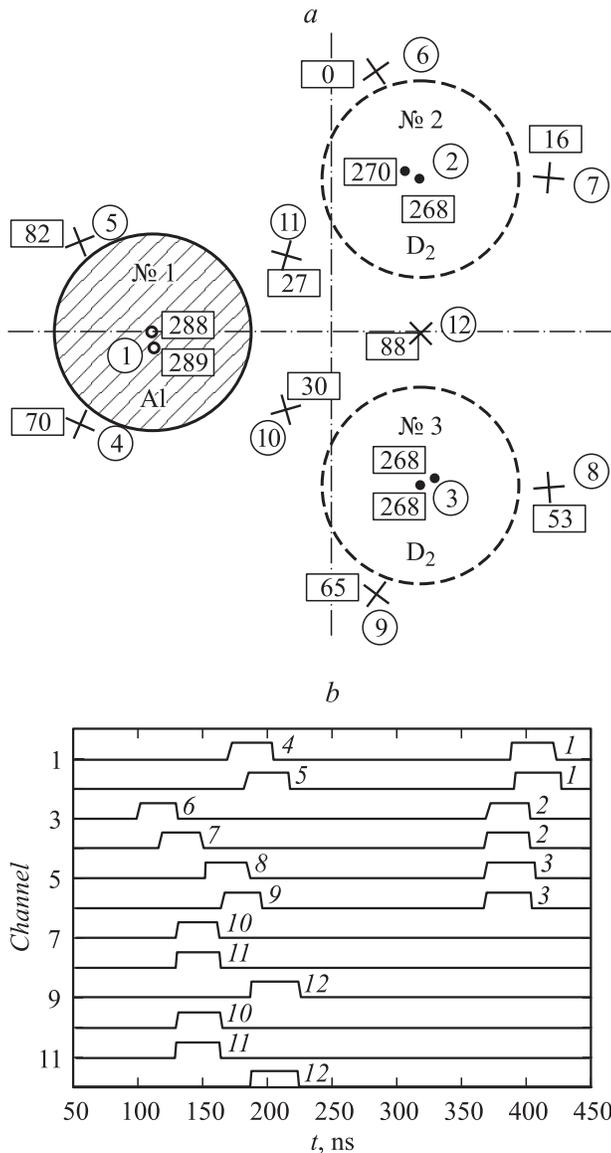


Рис. 6. Результаты измерений временных интервалов в одном из опытов с жидким дейтерием на измерительном устройстве МЗ-8: *a* — экспериментальное поле времен: цифры в кружках — номера электроконтактных датчиков, в квадратах — времена их срабатывания; *b* — соответствующая осциллограмма.

При замыкании рабочего контакта ($K1$ или $K2$) конденсатор $C1$ разряжается по цепи $K1$ ($K2$)— $R3$ — D — $C1$. Сформированный на резисторе $R3$ сигнал передается по цепи $C2$ — Z — $C3$ —делитель $R7/R8$ на осциллограф.

В качестве примера на рис. 6, *a* приведена запись экспериментального временного поля одного конкретного опыта (среднего по качеству симметрии ударной волны), выполненного с жидким дейтерием на заряде МЗ-8. Время прохождения ударной волны по образцам определялось по записи рабочих сигналов аналого-цифрового регистратора HP54645D (сигналы дублировались на регистраторах TDS). В соответствии с используемой

схемой распределения сигналов на шести из двенадцати каналов зафиксировано по два сигнала от срабатывания датчиков, на других шести — по одному (рис. 6, *b*). Первый по времени сигнал вызван срабатыванием датчика, расположенного на экране ($R_2 = 19.6$ mm), второй — срабатыванием датчика, расположенного в конце базы, на $R_1 = 15.6$ mm.

Видно, что максимальная разновременность подхода волны к границе алюминиевый экран—дейтерий по всей зоне расположения верхних контактов составляет 90 ns; в зоне расположения индивидуальных пробок — около 60 ns. Эти величины определяются, в основном, той реальной симметрией ударных волн, которая реализуется на наших сферических взрывных устройствах. Именно поэтому для получения на подобных системах надежных параметров по ударному сжатию исследуемого вещества необходимо проведение нескольких опытов с последующим усреднением полученных результатов. Обычно для достижения корректных результатов необходимо провести 3–5 отдельных опытов. При этом под корректностью результатов понимается то, что, как правило, такое количество опытов (соответственное количеству пробок исследуемого вещества) приводит к средней квадратичной ошибке среднего арифметического измерений не более 1–2% от волновой скорости. В данной работе мы придерживались именно этого критерия.

Система конденсации и контроль температуры

Для получения изотопов водорода в конденсированном состоянии было разработано специальное криогенное устройство, его элементами являются криососуд и криостат. В первом из них во время проведения опыта находится охладитель (жидкий гелий). Второй обеспечивает охлаждение газообразного исследуемого вещества до температуры конденсации и поддержания его в этом состоянии в течение времени, необходимого для проведения эксперимента. Принцип работы системы для конденсации изотопов водорода схематически показан на рис. 2.

Криостат состоит из двух частей: вакуумированного криопровода, по которому гелий поступает к охлаждаемой поверхности измерительной ячейки (криоячейки), и криоконтейнера, через который осуществляется подача газовой фазы исследуемого вещества в рабочую полость ячейки. Газ — дейтерий или протий — первоначально находится при давлении чуть больше атмосферного в полиэтиленовом газгольдере, из которого по вакуумному шлангу поступает в криоконтейнер, в нижней части которого находится рабочая полость криоячейки, где и происходит конденсация газа.

Гелий охлаждает алюминиевый экран, являющийся составной частью криоячейки, после чего свободно выходит в атмосферу. Внутри криопровода, в той его части, которая помещается в термостат с гелием, имеется

Таблица 1. Параметры ударного сжатия дейтерия

Параметры в Al экране ($D; U$), km/s	Измерительное устройство	ρ_0 , g/cm ³	D , km/s	U , km/s	P , GPa	ρ , g/cm ³
21.15; 12.53	M3-18	0.171	28.87 ± 0.40	22.05 ± 0.30	109 ± 3	0.724 ± 0.060
21.15; 12.53	M3-18	0.199	28.65 ± 0.40	21.59 ± 0.40	123 ± 2	0.808 ± 0.060
16.39; 8.53	M3-8	0.171	20.38 ± 0.30	15.38 ± 0.20	53.6 ± 1.0	0.697 ± 0.050
16.39; 8.53	M3-8	0.199	20.51 ± 0.20	15.06 ± 0.15	61.5 ± 0.9	0.749 ± 0.030
13.29; 5.99	M3-4	0.171	15.25 ± 0.30	10.95 ± 0.20	28.6 ± 0.8	0.606 ± 0.040
13.29; 5.99	M3-4	0.199	15.34 ± 0.30	10.76 ± 0.20	32.8 ± 0.9	0.667 ± 0.050

Таблица 2. Параметры ударного сжатия протия

Параметры в Al экране ($D; U$), km/s	Измерительное устройство	ρ_0 , g/cm ³	D , km/s	U , km/s	P , GPa	ρ , g/cm ³
21.15; 12.53	M3-18	0.088	31.30 ± 0.30	23.82 ± 0.30	65.6 ± 1.0	0.368 ± 0.030
16.39; 8.53	M3-8	0.088	22.20 ± 0.50	16.43 ± 0.30	32.1 ± 0.9	0.339 ± 0.030
13.29; 5.99	M3-4	0.088	16.67 ± 0.30	11.59 ± 0.20	17.0 ± 0.3	0.289 ± 0.020

нагреватель, с помощью которого можно частично или полностью испарять поступающий в криопровод жидкий гелий и тем самым регулировать количество и температуру парожидкостной смеси, охлаждающей криоячейку, куда поступает газообразный изотоп водорода. Эта регулировка и позволяет выдержать необходимое время нахождения исследуемого вещества в состоянии конденсатора. Внутри криоконтейнера все охлаждаемые поверхности, за исключением внутренней поверхности алюминиевого экрана, на которой собственно и происходит конденсация исследуемого вещества, покрыты теплоизолирующим слоем фторопласта (см. рис. 2, *b*).

Контроль температуры охлаждаемого образца осуществляется с помощью миниатюрных (~ 1 mm) термометров сопротивления полупроводникового типа. Они обеспечивают определение температур вблизи нужных нам значений с погрешностью, не превышающей 2% от измеряемого значения. В каждом опыте в рабочей зоне исследуемого вещества было два термометра (в верхней и нижней части исследуемого образца). Места их расположения выбирались так, чтобы они не влияли на замыкания электроконтактных датчиков.

При постепенном охлаждении измерительной ячейки температура в ней плавно доводилась до значений, соответствующих состоянию исследуемого вещества в требуемой фазе. При работе с жидкими образцами дейтерия эта температура соответствовала примерно 22 K и удерживалась постоянной в течение 20 min (до подрыва устройства).

При работе с твердыми образцами осуществлялся двухстадийный температурный режим: сначала образец выдерживался в течение 5–10 min в области устойчивого жидкого состояния, затем образец охлаждался до температур твердой фазы (5–10 K для протия, 5–15 K для дейтерия) и оставался при этих температурах

необходимое для подрыва устройства время. Строгим соблюдением указанного температурного режима обеспечивалось получение требуемого в опыте жидкого или твердого исходного состояния исследуемого изотопа.

Визуально процесс конденсации газа сопровождался достаточно резким уменьшением („схлопыванием“) объема газольдера.

Результаты измерений

Полученные параметры ударного сжатия дейтерия и водорода приведены в табл. 1 и 2.

Пояснения к таблицам.

1. Параметры исходных состояний в алюминии относятся к его „холодной“ адиабате ($T \approx 15$ K).

2. Волновые скорости в протии и дейтерии приведены с учетом отличия средних (экспериментальных) волновых скоростей от „мгновенных“ (на измерительном радиусе). Учтено также несоответствие радиусов измерений и радиусов границы Al–D₂(H₂). Суммарная поправка ($\Delta D_1 + \Delta D_2$) составляет: для M3-4 $\approx +50$, для M3-8 $\approx +70$ и для M3-18 $\approx +175$ m/s.

3. В отличие от ранее опубликованных данных в [12,13] параметры экспериментальных точек твердого дейтерия за счет поправок несколько изменились: волновые скорости увеличились, соответственно точки в P – ρ координатах сместились в сторону меньших плотностей. Причина этого — ошибка в знаке, допущенная при введении расчетных поправок (см. выше) в волновую скорость дейтерия: вместо увеличения она была уменьшена. Подчеркнем, что при переходе к правильному знаку ни одно из непосредственно полученных в опытах значений волновых скоростей не менялось. Не изменились и выводы, сделанные в [12,13] относительно

ошибочности данных NOVA и согласованности наших данных в данными Sandia.

Обсуждение экспериментальных результатов

Из трех типов исходных состояний исследуемых образцов наиболее полно изучен жидкий дейтерий. Для него получены данные по стандартным плоско-волновым методикам с использованием ВВ [1,2], на двухкаскадных газовых пушках [3,4], на сферических системах разгона лайнеров сходящимися продуктами взрыва ([12,13] и данная работа), а также на новых системах с применением лазерных [6,7] и электродинамических [14,15] устройств. Именно поэтому сопоставление результатов проведем прежде всего для этого состояния.

На рис. 7 в $D-U$ -координатах представлены все результаты, полученные на дейтерии. Прежде всего отметим вполне удовлетворительное совпадение наших данных с результатами Sandia [14,15] практически во всем диапазоне регистрации скоростей, в частности, неплохое совпадение параметров самой низкой экспериментальной точки, полученной на устройстве МЗ-4, с данными [2–4]. Как уже говорилось, целью наших измерений на этом заряде было формальное подтверждение правильности измерений сжатия малоплотных конденсированных веществ, какими являются конденсированные изотопы водорода, на полусферических измерительных устройствах. Совпадение экспериментальной точки по жидкому дейтерию с известными данными американских исследователей, полученными в плоской геометрии, снимает этот вопрос.

Экспериментальные точки NOVA, начиная с $D \approx 17 \text{ km/s}$, резко отходят от нашей $D-U$ -зависимости. Сильно отличаются и наклоны адиабат. Заметим, что в практике динамических измерений не было случая,

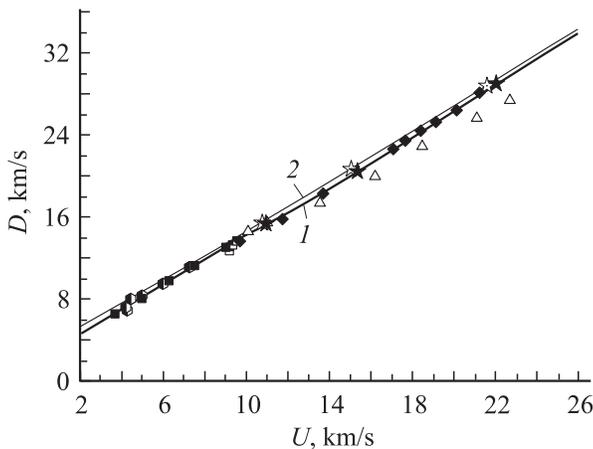


Рис. 7. Данные по дейтерию в $D-U$ -координатах. Эксперимент: \blacksquare — [4], \circ — [2], \blacksquare — [3], \triangle — [6], \blacklozenge — [15], \star — [24], \star — [12,13] и данная работа. Аппроксимация экспериментальных данных для D_2 : 1 и 2 — жидкое и твердое начальные состояния соответственно.

когда для одного вещества так сильно бы отличались данные, если, конечно, одна из методик не была ошибочной. В данном случае наши результаты (так же как и совпадающие данные Sandia) указывают, что, по крайней мере, интерпретация данных (а возможно, и сами данные) по сжатию жидкого дейтерия, полученных на лазерной установке, неправильна: никакими разумными изменениями параметров в наших опытах их нельзя свести воедино с результатами NOVA.

Следует подчеркнуть, что нами получены две ударные адиабаты дейтерия — с жидким и твердым исходными состояниями — и адиабата твердого протия. Их взаимные положения разумно соответствуют друг другу. В определенном смысле этим так же подтверждается их достоверность.

Данные, полученные для твердого протия, твердого и жидкого дейтерия, представляют собой примерно параллельные и близкие друг другу (в этих переменных) адиабаты. При этом они характеризуются одинаковыми особенностями. Рассмотрим их на примере жидкого дейтерия ($\rho_0 = 0.171 \text{ g/cm}^3$). Его адиабата может быть аппроксимирована в первом приближении тремя отрезками прямых линий $D = C_0 + sU$.

Первый участок ($U \leq 9 \text{ km/s}$) соответствует данным [2,3], и ему отвечают $C_0 = 2.2 \text{ km/s}$ и $s = 1.20$. На втором участке $C_0 = 3.2 \text{ km/s}$, $s = 1.09$ ($9 \leq U \leq 13 \text{ km/s}$). На третьем — $C_0 = 0.8 \text{ km/s}$, $s = 1.27$ ($13 \leq U \leq 30 \text{ km/s}$).

Уже само по себе представление $D(U)$ зависимости в виде ломаной линии, состоящей из трех прямолинейных отрезков разного наклона, является необычным, достаточно редко встречающимся в практике исследований ударных адиабат. (Возможны, конечно, и другие представления, например, кубическое описание второго участка по типу [24] при параболическом описании первого участка и т.п.) Естественно, оно должно иметь под собой какие-то физические причины, объясняющие подобный характер изменения $D(U)$. В данном случае единственной причиной этого может быть диссоциация молекул водорода, т.е. переход его в атомарное состояние.

Для дальнейшего анализа, являющегося продолжением начатого в работе [24], рассмотрим наклоны адиабат на втором и третьем участках. На рис. 7 видно, что наклон s при переходе от второго участка к третьему заметно увеличивается (примерно на 17%). Близкий характер носит и изменение наклонов у адиабат твердых дейтерия и протия.

На основе термодинамических соотношений было показано [18], что наклон ударной адиабаты имеет вид

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_H = \frac{C^2 - 0.5\Gamma(\sigma - 1)(D/\sigma)^2}{1 - 0.5\Gamma(\sigma - 1)}. \quad (1)$$

Здесь $C^2 = (\partial P/\partial \rho)_S$ — квадрат скорости звука в сжатом веществе, $\Gamma = (\partial P/\partial \epsilon)_\rho/\rho$ — эффективный коэффициент

Грюнайзена², D и σ — соответственно ударно-волновая скорость и сжатие.

По определению, Γ есть отношение теплового давления к плотности тепловой энергии. Для каждого из тепловых процессов его величина своя, как правило, находящаяся в пределах 0.2–1.5. С ростом амплитуды ударной волны температура сжатого вещества увеличивается, происходит перераспределение тепловой энергии между различными степенями свободы частиц. Для веществ только с поступательными степенями свободы $\Gamma = 2/3$. Для газа, представляющего собой смесь двухатомных молекул и образовавшихся в результате диссоциации атомов, с учетом вращательных и колебательных степеней свободы молекулы можно получить [25]: $\Gamma = 2(1 + \beta)/(7 - \beta)$, где β — степень диссоциации молекул.

В области предельных режимов сжатия знаменатель в формуле (1) близок к нулю. Отсюда $\Gamma = 2/(\sigma_{\text{lim}} - 1)$. Для линейной $D(U)$ зависимости $\sigma_{\text{lim}} = s/(s - 1)$. В этом случае $\Gamma = 2(s - 1)$, и, учитывая связь Γ и β , получаем $s = 8(7 - \beta)^{-1}$. В отсутствие диссоциации $\beta = 0$, $\Gamma = 2/7$, $\sigma_{\text{lim}} = 8$, $s = 8/7 \cong 1.14$. При завершённой диссоциации $\beta = 1$, $\Gamma = 2/3$, $\sigma_{\text{lim}} = 4$ и $s = 4/3 \cong 1.33$.

Эксперимент показывает, что в третьей области ($40 \leq P \leq 200$ GPa) $s^{(\text{III})} \cong 1.27$, чему соответствуют $\sigma_{\text{lim}} \cong 4.7$, $\Gamma \cong 0.54$, $\beta \cong 0.7$. Это означает, что в этой области большинство молекул диссоциировало.

Значению $s^{(\text{I})} \cong 1.20$ в первой области ($P \leq 20$ GPa) соответствует $\beta \cong 0.3$, т.е. в этой области диссоциирует относительно небольшое количество молекул.

Сравнение полученных оценок для β первого и третьего участков адиабаты указывает, что на втором ($20 \leq P \leq 40$ GPa) начинается интенсивный процесс тепловой диссоциации D_2 .

Как следует из [8,26], этот процесс начинается за фронтом ударной волны при давлении ≥ 20 GPa и температуре ≈ 5000 K (это совпадает с нижней границей второго участка) и, в основном, заканчивается при давлении 40–50 GPa и температуре $\approx 15\,000$ K. Именно этому давлению примерно отвечает начало третьего участка $D(U)$ соотношения ($U \approx 15$ km/s, $D \approx 20$ km/s, $P \approx 50$ GPa). Можно считать, что мы не противоречим также данным работ [15,27,28], и завершение перехода к атомарному состоянию дейтерия происходит вблизи этих параметров ударных волн.

Так же как и для жидкого дейтерия, ударная адиабата твердого протия (показана на рис. 8) и твердого дейтерия (рис. 7) может быть представлена в $D-U$ -координатах прямолинейными отрезками близкого наклона. Оценка наклона на последнем участке соответствующей $D(U)$ -зависимости приводит к $s \cong 1.25$ для твердого дейтерия и $\cong 1.23$ для твердого протия, чему отвечают $\sigma_{\text{lim}} \cong 5.00$ и $\sigma_{\text{lim}} \cong 5.35$. Соответственно $\Gamma \cong 0.5$ (твердый дейтерий) и $\Gamma \cong 0.46$ (твердый протий), что отражает меньшую степень диссоциации при

² При анализе хода ударной адиабаты идеального газа иногда используется показатель $\gamma = C_P/C_V = \Gamma + 1$, где C_P и C_V — изобарическая и изотермическая теплоемкости газа.

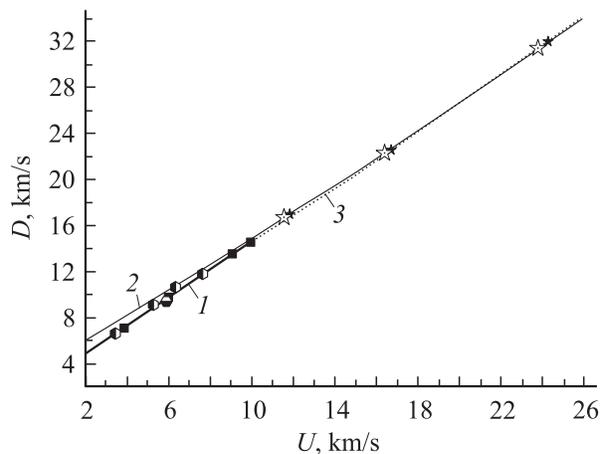


Рис. 8. Данные по протию в $D-U$ -координатах. Эксперимент: \circ — [1], \bullet — [2], \blacksquare — [3], \star — данная работа. Аппроксимация экспериментальных данных для H_2 : 1 и 2 — жидкое и твердое начальные состояния, \star — точки для жидкого протия, рассчитанные по экспериментальным результатам для твердого протия; 3 — аппроксимация расчетных данных для жидкого протия.

близких значениях волновых скоростей, чем в жидком дейтерии.

Обратим внимание, что различие в наклонах зависимостей $D(U)$ для обеих фаз дейтерия мал и фактически находится в пределах ошибки измерений. Для корректного анализа изменений, происходящих на границах участков $D(U)$ -зависимости, не достает прецизионных измерений сжатия всех исследованных в работе изотопов водорода.

Рассмотрим теперь совокупность экспериментальных данных в $P-\rho$ -координатах. Уже говорилось о том, что для получения надежных данных о сжатии дейтерия (протия) на каждом сферическом измерительном устройстве МЗ необходимо проведение серии из

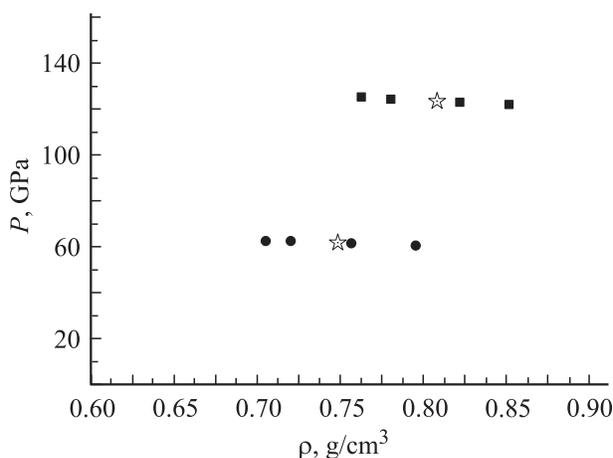


Рис. 9. Результаты отдельных опытов с твердым дейтерием в $P-\rho$ -координатах: \blacksquare — устройство МЗ-18, \bullet — устройство МЗ-8, \star — результаты статистической обработки.

3–5 отдельных опытов с последующим усреднением результатов. Это иллюстрирует рис. 9, где наряду со средними значениями (звездочки) показано положение экспериментальных точек отдельных опытов (кружки и квадраты) на твердом дейтерии. Их параметры получены при одних и тех же исходных состояниях в алюминевом экране. Виден существенный разброс точек по отдельным опытам (он еще более возрастает при учете погрешностей в экране). Очевидно, что, ограничиваясь единичными измерениями (опытами), можно получить совершенно нереальную картину сжатия исследуемого вещества.

Данные по дейтерию сопоставлены на рис. 10. Здесь особенно наглядно видна противоречивость данных NOVA нашим и проведенным Sandia измерениям. Обращают на себя внимание большие погрешности в отдельных измерениях американских исследователей на NOVA, когда речь идет о единичных измерениях. Возможно, что отчасти они связаны с миниатюрностью используемых ими измерительных ячеек. Так, ячейка на NOVA имеет диаметр 1 mm (!), а общая толщина экрана и образца составляет 0.7 mm (!). Представляется, что ювелирность работы с такими образцами оставляет немалые возможности появления непредсказуемых погрешностей.

В наших опытах, когда диаметр и толщина образцов в 20 раз превосходит соответствующие величины образцов на NOVA, таких вопросов не возникает. Как видно из рис. 10 (см. также [24]), взаимные погрешности аппроксимирующих кривых, обусловленные совокупной погрешностью всех наших экспериментальных точек и данных [15], не имеют общего перекрытия с данными NOVA. Это и является доказательством ошибочности последних.

Вместе с тем внутренняя согласованность наших результатов, полученных по методике, многократно проверенной на сотнях независимых экспериментов (включая опыты на газовых пушках и взрывных системах с ВВ), не дает никаких оснований для сомнений в их достоверности.

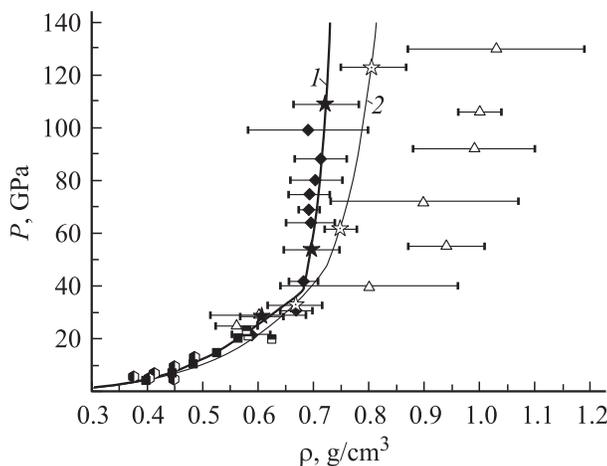


Рис. 10. Данные по дейтерию в P – ρ -координатах. Обозначения, как на рис. 7.

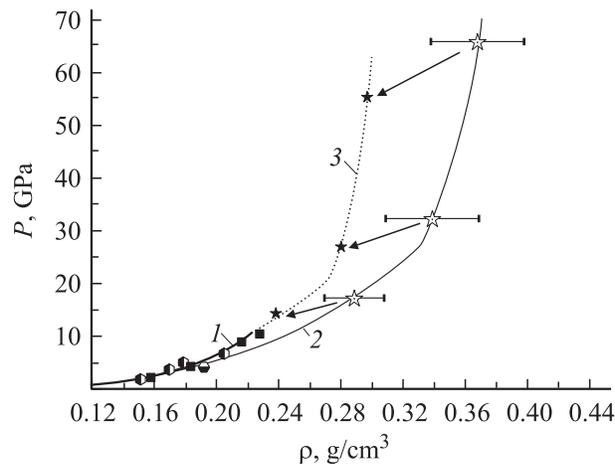


Рис. 11. Данные по протию в P – ρ -координатах. Обозначения, как на рис. 8.

Таким образом, проверку результатов, полученных на NOVA, можно считать законченной. Ее итог — доказательство ошибочности результатов, полученных в [6,7].

Будет нелишне подчеркнуть еще раз хорошее совпадение наших данных и данных Sandia практически во всем исследуемом интервале давлений. Исключение составляют точки (наша и Sandia) при давлении ≈ 30 GPa. Трудно сказать, в чем причина этого расхождения — во всяком случае, не в малом числе проведенных экспериментов: параметры нашей точки являются усреднением четырех опытов, в Sandia точка усредняет шесть (!) опытов. Скорее всего, причина различий кроется в недостаточном количестве экспериментальных данных в районе 30–50 GPa, где происходит процесс интенсивной диссоциации молекул дейтерия. Этот процесс сопровождается затратами энергии и увеличением сжатия дейтерия, что, судя по параметрам точки Sandia, и происходит в этих условиях. Скорее всего, дополнительные эксперименты с жидким дейтерием, проведенные на полусферических устройствах в указанном диапазоне давлений, могли бы снять вопрос о кажущемся несоответствии этих экспериментов.

Результаты по протию в P – ρ -координатах приведены на рис. 11, где они сопоставлены с американскими данными [1–3], относящимися к существенно меньшим давлениям³.

Стрелками на рис. 11 показано пересчитанное положение наших экспериментальных точек на исходную плотность жидкого протия. Этот пересчет проводился следующим образом. Три экспериментальные точки, полученные на каждом измерительном устройстве (МЗ-4, МЗ-8 и МЗ-18) для трех исходных состояний, характеризующихся разными начальными плотностями (от 0.199 — для твердого дейтерия до 0.088 g/cm³ — для твердого протия), определяют свою прямую линию в

³ В работах [1–3] исследовался исходно жидкий протий, у нас — протий в твердой фазе.

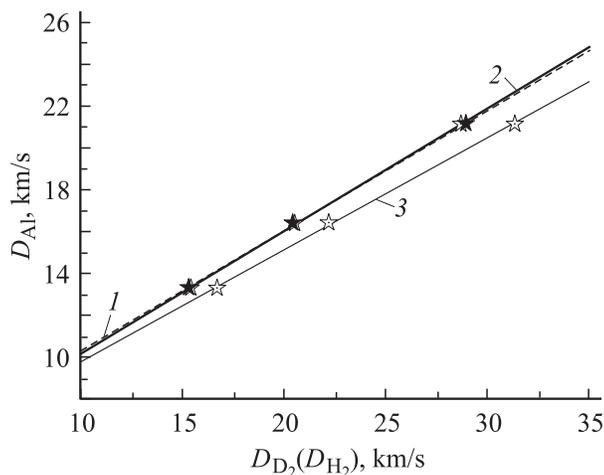


Рис. 12. Сопоставление волновых скоростей в эталонном и исследуемом веществах. Эксперимент: ★ — данная работа (жидкий D_2), ☆ — данная работа (твердый D_2 и твердый H_2). Аппроксимация экспериментальных результатов: 1 — жидкий D_2 , 2 — твердый D_2 , 3 — твердый H_2 .

координатах $D(\rho_0)$. Для каждого устройства, т.е. для каждой линии известны (и они одинаковы!) исходные состояния в экране (Al), определяющие параметры сжатия того или иного изотопа. Используя значения этих состояний и выбирая любую промежуточную исходную плотность (и соответственно отвечающую ей волновую скорость на прямой $D(\rho_0)$), можно определить (тем же методом отражения [17]) все интересующие нас ударно-волновые параметры для выбранного значения ρ_0 . Для протия подобная процедура была проведена при небольшой экстраполяции прямых $D(\rho_0)$ до плотности его жидкого состояния (0.071 g/cm^3). Возможная вариация наклонов прямых несильно сказывается на конечных результатах, в частности на положении ударной адиабаты жидкого протия.

В целом видно неплохое соответствие наших данных и американских, относящихся к жидкому протию. В определенном смысле это свидетельствует в пользу разумности сделанного предположения о линейности зависимости D от начальной плотности.

Отметим, что ударное сжатие водорода в твердом исходном состоянии до сих пор никем не исследовалось, а максимальные давления в наших экспериментах в шесть раз превосходят американские данные по жидкому водороду.

В заключение проведем сопоставление волновых скоростей в эталонном (алюминий) и исследуемых веществах. Линейность таких D – D -зависимостей является одним из критериев правильности полученных результатов и широко используется в практике ударно-волновых исследований. Это сопоставление показано на рис. 12. С хорошим приближением зависимости действительно являются линейными.

Заключение

Основные результаты:

— получены ударные адиабаты жидкого и твердого (в исходном состоянии) дейтерия до давления 123 GPa, а также твердого протия до 66 GPa. Данные по твердому дейтерию и протию являются первыми и единственными в мировой практике подобных исследований;

— показана ошибочность данных по сжатию жидкого дейтерия, полученных в LLNL с использованием лазерной установки NOVA;

— полученные результаты являются тестовыми для калибровки уравнений состояния изотопов водорода и используются для этих целей;

— на основе допущения о линейном характере зависимости волновой скорости от начальной плотности показана возможность получения ударной адиабаты промежуточной плотности — от твердого дейтерия до твердого протия;

— при небольшой экстраполяции зависимости $D(\rho_0)$ к плотности жидкого протия получена его адиабата в области давлений, существенно превосходящих известные американские данные;

— анализ результатов указывает на сложный характер полученных зависимостей, наиболее вероятная интерпретация которых — переход исследуемых изотопов водорода в атомарное состояние в результате диссоциации его молекул под действием температуры и давления ударной волны.

Список литературы

- [1] Van Thiel L.M., Alder B.J. // Mol. Phys. 1966. Vol. 10. P. 427.
- [2] Dick R.D., Kerley G.I. // J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 5264.
- [3] Nellis W.J., Mitchell A.C., van Thiel L.M. et al. // J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 1480.
- [4] Van Thiel L.M., Ross M., Hord B.L. et al. // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31. P. 979.
- [5] Григорьев Ф.В., Кормер С.Б., Михайлова О.Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. С. 286.
- [6] Da Silva L.B., Celliers P., Collins G.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. P. 483.
- [7] Collins G.W., Da Silva L.B., Celler P. et al. // Science. 1998. Vol. 281. P. 1178.
- [8] Копышев В.П., Урлин В.Д. // Ударные волны и экстремальные состояния веществ / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. М.: Наука, 2000. 297 с.
- [9] Kerley G.I. // SANDIA REPORTS and 2003–3613 Unlimited Release Print. 2003.
- [10] Holmes N.C., Ross M., Nellis W.J. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52. P. 15 83.
- [11] Nellis W.J. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 89. P. 165 502.
- [12] Белов С.И., Борисков Г.В., Быков А.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76. С. 508.
- [13] Белов С.И., Борисков Г.В., Быков А.И. и др. // ДАН. 2003. Т. 392. С. 755.
- [14] Knudson M.D., Hanson D.L., Bailey J.E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 225 501.

- [15] *Knudson M.D., Hanson D.L., Bailey J.E. et al. // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. P. 144 209.*
- [16] *Альтицлер Л.В., Трунин Р.Ф., Крупников К.К., Панов Н.В. УФН. 1996. Т. 166. С. 575.*
- [17] *Альтицлер Л.В., Крупников К.К., Бражник М.И. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 886.*
- [18] *Урлин В.Д. // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 485.*
- [19] *Медведев А.Б. // Вопр. атомн. науки и техн. Сер. Теор. и прикл. физика. 1992. Вып. 1. С. 23.*
- [20] *Сапожников А.Т., Перишина А.В. // Вопр. атомн. науки и техн. 1979. Вып. 4. С. 47.*
- [21] *Глушаков Б.Л., Гударенко Л.Ф., Стяжкин Ю.М., Жеребцов В.А. // Вопр. атомн. науки и техн. Сер. Мат. моделир. физ. процессов. 1991. Вып. 1. С. 32.*
- [22] *Kerley G.I. // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 441.*
- [23] *Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров, 2001.*
- [24] *Boriskov G.V., Bykov A.I., Nellis W.J. et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 092 104.*
- [25] *Зельтович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.*
- [26] *Desjarlais M.P. // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. P. 064 204.*
- [27] *Celliers P.M., Collins G.W., Da Silva L.B. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 5564.*
- [28] *Collins G.W., Celliers P.M., Da Silva L.B. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 165 504.*