

О СКАЧКАХ ПЛОТНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ДИНАМИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Р. Ф. Трунин¹, А. Б. Медведев^{1,2}

¹ СарФТИ НИЯУ МИФИ, 607186, г. Саров Нижегородской обл.

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Проведено сравнение известных экспериментальных данных по ударно-волновому и квазиизэнтропическому сжатию протия и дейтерия в широких диапазонах изменения давлений и плотностей. Показано, что найденные скачки плотности на ударной адиабате исходно жидкого дейтерия при давлении ≈ 30 ГПа и на изэнтропе сжатия дейтерия при ≈ 150 ГПа не подтверждаются другими исследованиями. Существующие данные не отрицают наличия особенности поведения водорода при изэнтропическом сжатии в районе ≈ 300 ГПа.

Ключевые слова: водород, дейтерий, протий, давление, плотность, ударное сжатие, квазиизэнтропическое сжатие.

Введение

Знание свойств изотопов водорода при высоких значениях давления P и плотности ρ требуется при решении различного рода научно-технических задач. Для получения данных широко применяются динамические методы ударного и квазиизэнтропического сжатия исходно конденсированных (жидких и твердых) и исходно газообразных (с относительно высокой начальной плотностью, достигаемой предварительным статическим поджатием) образцов. Подобные исследования проводятся приблизительно на протяжении полувека.

Впервые ударное сжатие исходно жидкого протия до ≈ 10 ГПа исследовалось в работе Ван Тила и Алдера [1] (1966 г.). К 1973–1983 гг. относятся исследования американских ученых ударного сжатия жидкого дейтерия до ≈ 23 ГПа [2, 3]. Данные [1–3] были получены на так называемых плоских измерительных устройствах, использующих в качестве энергетического источника взрывчатые вещества, продукты взрыва которых в конечном итоге создавали в образцах плоские стационарные ударные волны.

В дальнейшем, практически до конца прошлого столетия, сообщений по ударному сжатию изотопов водорода не было. Лишь в конце 1990-х гг. американские ученые опубликовали результаты опытов с жидким дейтерием до давлений ≈ 300 ГПа [4, 5]. Для создания сильных ударных волн ими использовался новый энергетический источник – лазерная установка Nova. При $P \geq 30$ ГПа авторы работ [4, 5] обнаружили на ударной адиабате резкое, практически скачкообразное, увеличение плотности дейтерия, составляющее $\approx 0,2$ г/см³. Данные были описаны полуэмпирическим уравнением состояния с учетом диссоциации молекулярного водорода на атомарный.

Другим направлением исследований водорода было изучение его квазиизэнтропического сжатия. В этом случае исходные образцы последовательно нагружаются рядом относительно слабых ударных волн убывающей амплитуды. В конечных состояниях создаются необходимые для исследований высокие (в том числе мегабарного диапазона) давления и существенно меньшие по сравнению с реализуемыми при однократном ударном сжатии температуры нагрева вещества (они по порядку величины такие же, как вдоль изэнтропы, исходя-

щей из начального состояния вещества; отсюда и термин – квазиизэнтропичность сжатия).

Начало этих работ относится к 1970-м гг., когда советскими учеными Ф. В. Григорьевым и С. Б. Кормером с сотрудниками было проведено изучение квазиизэнтропического сжатия протия в диапазоне давлений $\approx 40\div 1300$ ГПа [6–8] (точка при $P \approx 1300$ ГПа опубликована в работе [9]). Используемое ими устройство представляло собой иницируемый по всей поверхности сферический заряд взрывчатого вещества, продукты взрыва которого «разгоняли» к центру системы стальную сферическую оболочку, внутренняя полость которой была заполнена исследуемым плотным газом. В процессе «схождения» оболочки осуществлялось сжатие протия. Для выявления траектории движения оболочки использовалась рентгеновская установка, излучение которой фиксировалось на фотопленку. Результатом опытов является набор зависимостей внутреннего радиуса оболочки R от времени t . Каждая из $R(t)$ -зависимостей включает фазу торможения оболочки на газе, ее остановку и стадию «разлета». По радиусу остановки из условия сохранения массы газа находится его максимальная средняя плотность (при известной начальной плотности, отвечающей исходному повышенному давлению и близкой к комнатной температуре). Опыты проводились при нескольких начальных радиусах оболочки и начальных плотностях газа в полости. Ввиду невозможности экспериментального определения давления в системах [6–8], оно находилось расчетным путем по одномерным газодинамическим программам с использованием уравнений состояния всех веществ, входящих в состав используемой конструкции (в том числе уравнение газа, которое подбиралось так, чтобы воспроизвести измеренные $R(t)$ -зависимости и ряд других данных при сравнительно небольших давлениях). В конечном итоге была подробно исследована $P(\rho)$ кривая сжатия (P и ρ отвечают минимуму на $R(t)$ -зависимостях) протия, на которой при давлении ≈ 320 ГПа был зафиксирован скачок плотности. Он был интерпретирован как фазовый переход молекулярного водорода в атомарный и воспроизведен с помощью полуэмпирического уравнения состояния. Данные работ [6–8] при этом давлении имеют значительную погрешность, что не позволяет говорить уверенно о выявленной особенности.

Упомянутые выше скачки плотности при ударно-волновом и квазиизэнтропическом сжатии требовали дополнительного подтверждения. При

этом представлялось целесообразным не простое повторение опытов в прежней постановке, а, по возможности, использование в проблемных областях состояний других измерительных устройств.

Далее будут приведены результаты подобных исследований с их кратким анализом и нашими выводами. Возможно, по представленным данным читатели сделают свое заключение о наличии или отсутствии скачков плотности при сжатии водорода.

Ударное сжатие водорода

По предложению В. Е. Фортова, поддержанному Р. И. Ильяевым, было решено провести проверку результатов [4, 5], используя традиционные, развитые в РФЯЦ-ВНИИЭФ, способы создания сильных ударных волн с помощью измерительных устройств [10, 11]. Они основаны на использовании ускорения тонкостенных стальных полусферических оболочек продуктами взрыва мощных взрывчатых веществ. Схема такого устройства приведена на рис. 1. Система инициирования осуществляет одновременный подрыв заряда взрывчатого вещества по всей полусферической поверхности устройства. Продукты взрыва, расширяясь через небольшой воздушный промежуток, «мягко» (без существенных скачков в скоростях) разгоняют стальной ударник (оболочку), скорость которого на малых радиусах движения достигает необходимых для исследований величин. Удар такой оболочки по алюминиевому экрану, прикрывающему исследуемые образцы водорода, создает в водороде давления более 100 ГПа. Для регистрации скоростей ударных волн применялись электроконтактные датчики, ранее использованные практически во всех измерениях ударного сжатия веществ, проведенных с помощью устройств [10, 11]. Измерительные устройства прокалиброваны в серии предварительных экспериментов, в которых выявлена скорость полета ударника на всем пути его движения и скорость волны в алюминиевых экранах на разных радиусах их расположения. Кроме того, в каждом из вновь проведенных с водородом опытов скорость волны в экранах контролировалась дополнительно.

Для получения изотопов водорода в конденсированном состоянии разработана [12, 13] криогенная система, в которой с помощью жидкого гелия (охладитель) производится плавное снижение температуры для перевода исследуемого газа

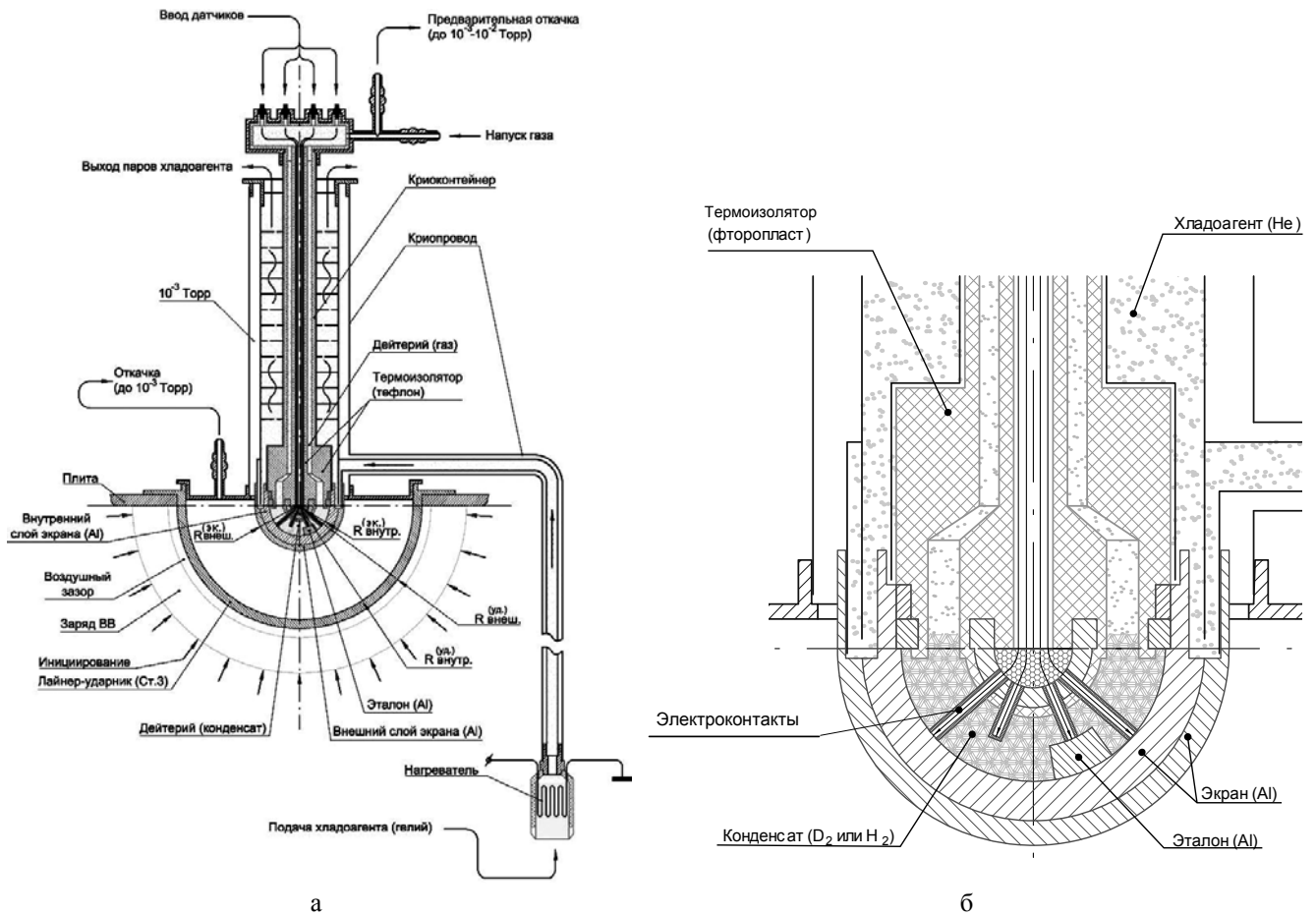


Рис. 1. Эскиз экспериментального устройства: а – общий вид; б – центральная часть

в жидкую (или твердую) фазу. После достижения необходимой температуры система поддерживает ее постоянной в течение времени, необходимого для проведения опыта. Исходные плотности ρ_0 исследуемых образцов составляли: $0,088 \text{ г/см}^3$ для твердого протия, $0,199 \text{ г/см}^3$ для твердого дейтерия и $0,171 \text{ г/см}^3$ для жидкого дейтерия.

Нахождение параметров сжатия протия и дейтерия проводилось методом отражения [14], основанным на определении скоростей прохождения ударной волны в исследуемом веществе и прикрывающем его экране. Уравнение состояния материала экрана (его ударная адиабата и изэнтропы расширения) при этом считается известным.

Для большей убедительности и надежности результатов исследовались два изотопа водорода – дейтерий и протий, причем для дейтерия проведены измерения ударного сжатия двух исходных фаз – жидкой и твердой. Протий исследовался только в исходно твердом состоянии.

В итоге были получены ударные адиабаты исходно жидкого и твердого дейтерия до давлений 120 ГПа и исходно твердого протия до 66 ГПа [15, 16]. Параметры каждой экспериментальной

точки являются средней величиной трех-четырёх независимых опытов.

Одновременно и независимо проверка результатов определения ударного сжатия жидкого дейтерия проводилась в лаборатории Сандия [17, 18]. При этом использовалась новая система разгона до необходимых скоростей плоского ударника сильным магнитным полем. Максимальные давления в дейтерии составили ≈ 100 ГПа.

В 2009 г. стали также известны результаты исследований ударного сжатия исходно жидкого дейтерия американских ученых, проведенные с использованием более мощной, по сравнению с Nova, лазерной установки Omega [19].

Результаты всех измерений ударного сжатия дейтерия приведены на рис. 2. Из рисунка видно:

1) удовлетворительное совпадение данных [15, 17–19] по ударной сжимаемости исходно жидкого дейтерия;

2) взаимное расположение ударных адиабат жидкого и твердого дейтерия [15] соответствует их исходным плотностям – адиабата твердого дейтерия во всем диапазоне давлений отвечает большим плотностям по сравнению с адиабатой жидкого;

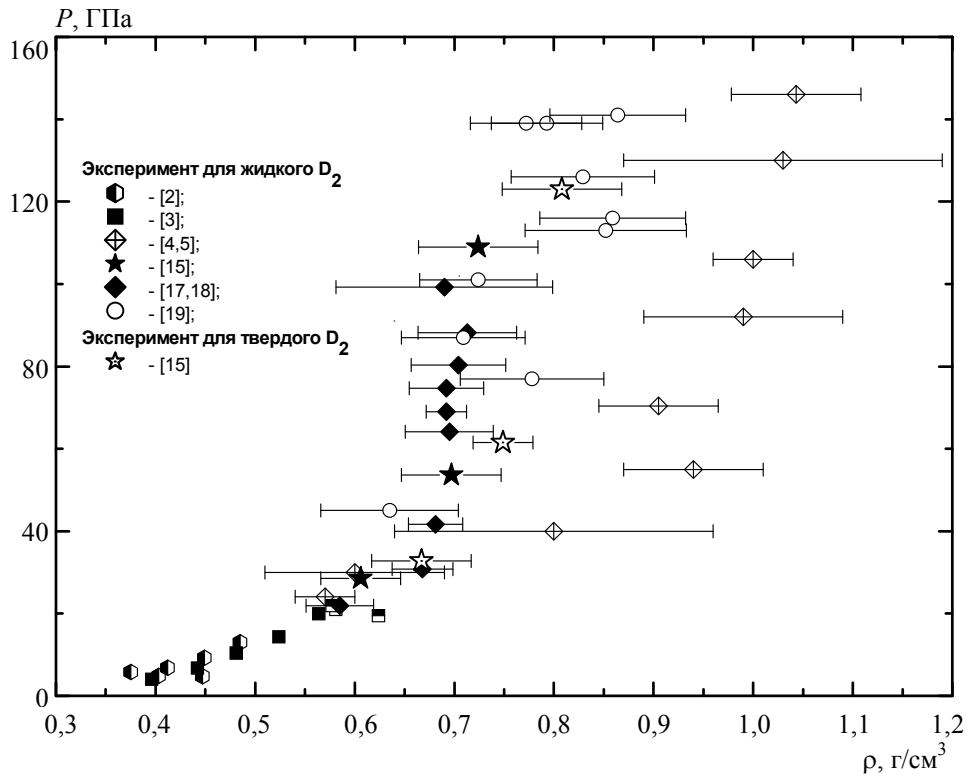


Рис. 2. Ударное сжатие дейтерия

3) погрешности экспериментальных точек [15, 17, 18] не имеют общего перекрытия с данными Nova;

4) скачок плотности, полученный на Nova, не подтверждается совокупными данными [15, 17–19];

5) экспериментальные данные [15, 17–19] указывают на то, что при давлении, большем $\approx 35\text{--}40$ ГПа, происходит достаточно отчетливое уменьшение сжимаемости дейтерия (примерно такой же характер имеет и адиабата протия [15]).

Резкое уменьшение сжимаемости можно объяснить завершением диссоциации и переходом дейтерия в атомарное состояние.

Квазиизэнтропическое сжатие водорода

М. А. Мочаловым с использованием улучшенной рентгеновской техники были проведены новые опыты по исследованию квазиизэнтропического сжатия исходно плотного газообразного дейтерия [20, 21], одной из целей которых было уточнение данных Григорьева–Кормера, полученных на установке сферического типа (рис. 3). Опыты проводились на новой установке цилиндрической конструкции (рис. 4). Так же как и в сферических, в этих опытах рентгенографически фиксируется временная $R(t)$ -зависимость движения стальной оболочки вплоть до ее остановки и по-

следующего разлета. Начальная температура газа близка к комнатной. Значение давления, соответствующее максимальному сжатию, берется из одномерного расчета газодинамического процесса. В работах [20, 21] сделан вывод о совпадении полученных данных в пределах точности измерений с данными Григорьева–Кормера [6–8] при $P \approx 100\text{--}300$ ГПа.

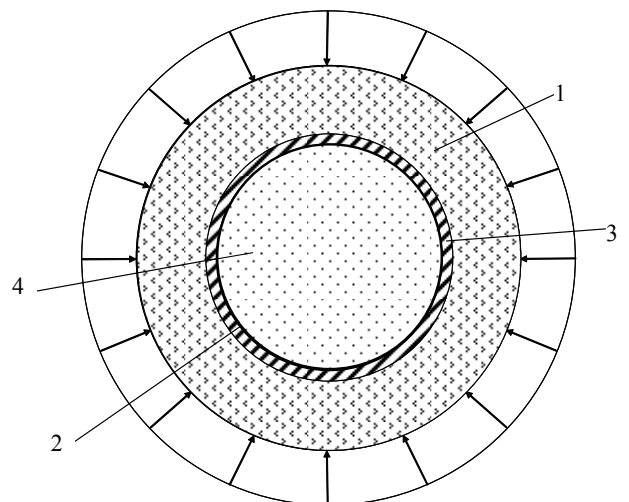


Рис. 3. Схема опытов по исследованию квазиизэнтропического сжатия водорода с использованием сферического устройства: 1 – взрывчатое вещество; 2 – контрастирующая фольга; 3 – стальная оболочка; 4 – исследуемый газ

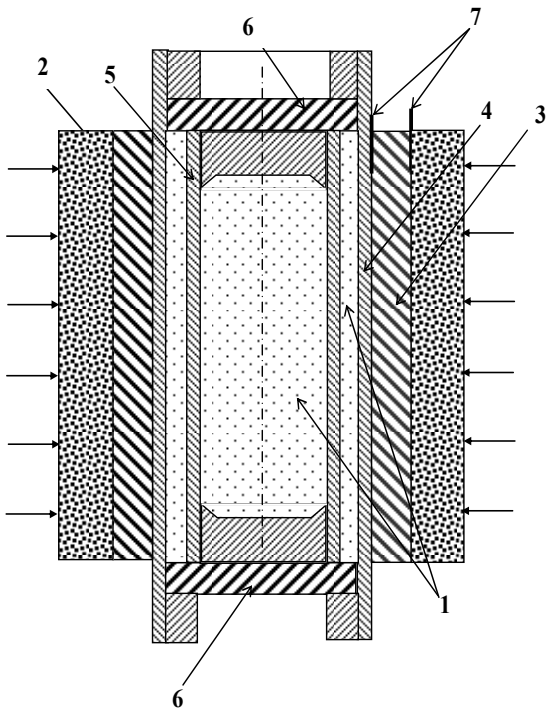


Рис. 4. Схема опытов по исследованию квазиизэнтропического сжатия водорода с использованием цилиндрического устройства: 1 – газ; 2 – взрывчатое вещество; 3 – прокладка из оргстекла; 4, 5 – стальные оболочки; 6 – заглушки

Несколько позже результаты работ [20, 21] были скорректированы, дополнены и в обновленном виде опубликованы в работе [22]. Данные [22] существенно отличаются от данных [6–8] и [20, 21] (отличие от последних в [22] не комментируется), показывая при $P \approx 150$ ГПа наличие скачка плотности на $\approx 20\%$.

Г. В. Борисковым, А. И. Быковым и др. были выполнены эксперименты с образцами как протия, так и дейтерия, находящимся в исходно твердом начальном состоянии [13, 23, 24]. Использовалась двухкаскадная цилиндрическая система нагружения образцов, в которой продукты взрыва кольцевого заряда ВВ разгоняют первый каскад, представляющий собой соленоид, на который разряжается мощная конденсаторная батарея, создавая сильный магнитный поток (система МК-1 [25]). Под действием продуктов взрыва первый каскад ускоряется к центру системы, сжимая магнитное поле, которое в конечном итоге воздействует на медную капсулу, содержащую, помимо исследуемого изотопа водорода, образец эталонного материала (алюминий). Под действием давления магнитного поля стенки медной капсулы плавно, без ударно-волновых нагрузок в исследуемых образ-

цах, характерных для цилиндрической системы [20–22], сжимаются вместе с находящимся в капсуле алюминиевым эталоном и исследуемым изотопом водорода. В заданное время производится рентгенографирование процесса. Отметим, что в этих опытах давление в исследуемых образцах находилось не расчетным способом (как во всех других вышеупомянутых квазиизэнтропических исследованиях), а по экспериментально измеренному значению p в эталонном алюминии (для него зависимость $P(p)$ известна). В опытах [13, 23, 24] реализуются сравнительно небольшие температуры сжатого водорода, по оценкам при максимальных давлениях (≈ 550 ГПа) – несколько сот градусов (в опытах по сжатию исходно газообразных образцов – несколько тысяч градусов).

Для проверки результатов [22] М. В. Жерноклетовым и др. были проведены опыты с плотным газообразным дейтерием (начальная температура близка к комнатной), два из которых целенаправленно были ориентированы на давление ≈ 150 ГПа [26]. В экспериментах использовалась установка [20–22] (с некоторой модификацией). При этом для регистрации рентгеновского изображения оболочек применялась система диагностики, включающая ADC-комплекс для цифровой рентгенографии (CR) [27, 28], имеющая преимущества по сравнению с фиксацией изображения на фотопленку (часть результатов [22] получена с применением фотопленки, часть – с применением CR). Также во избежание субъективизма, присущего визуальному способу обработки рентгенограмм, в [26] при их анализе использовался денситметрический функциональный метод [29] (в [22] применялась комбинация этих методов). В [26], как и в работах [20–22], при одномерном расчете газодинамического процесса применялось уравнение состояния водорода Копышева–Хрусталева [30], калиброванное на результаты [6–8].

Все обсуждавшиеся выше данные по квазиизэнтропическому сжатию водорода приведены на рис. 5. Для лучшей наглядности диапазон давлений ограничен 600 ГПа. Данные по плотности отвечают дейтерию. Плотность водорода увеличена вдвое.

Из рисунка можно сделать следующие выводы:

1) данные [6–8, 13, 20, 21, 23, 24, 26] в пределах погрешности определения плотности согласуются друг с другом;

2) зарегистрированная плотность в [13, 23, 24] на несколько процентов больше чем в других измерениях п. 1, что можно объяснить влиянием температуры (начальной и, как следствие, конечной);

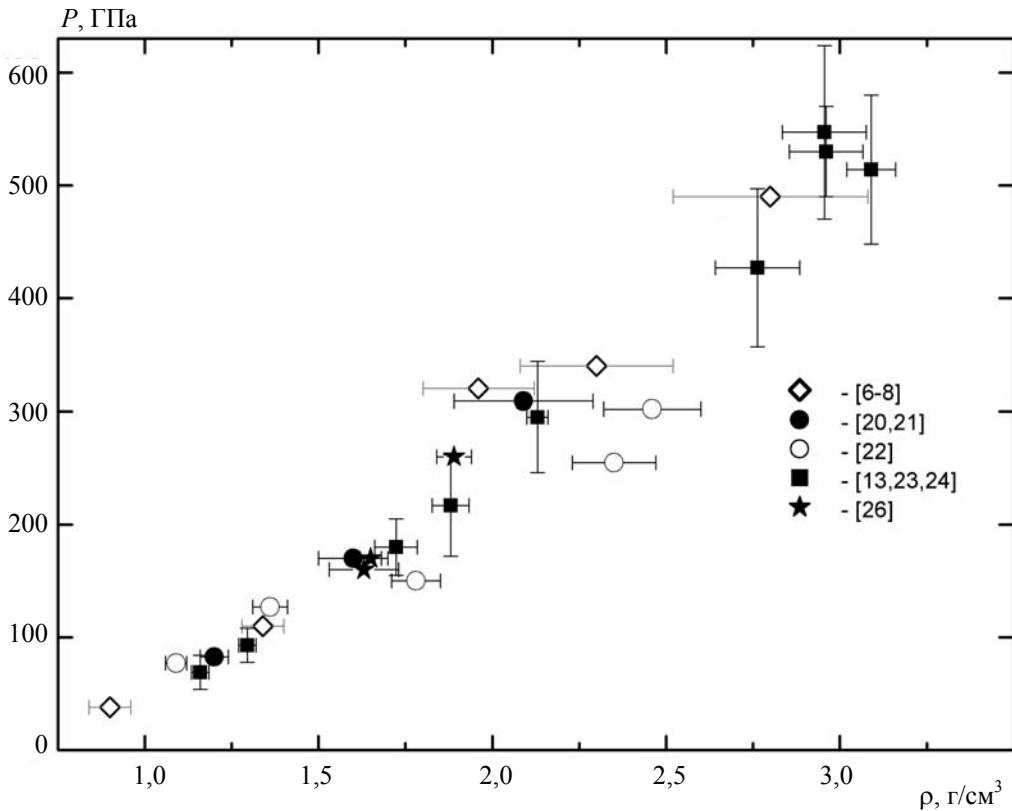


Рис. 5. Квазиизэнтропическое сжатие водорода

3) результаты всех исследований п. 1 не показывают скачка плотности на кривой сжатия дейтерия при давлении ≈ 150 ГПа, имеющего место согласно [22];

4) результаты [26] подтверждают относительно крутой ход кривой сжатия, выявленный в [6–8] в диапазоне давлений до ≈ 320 ГПа. Тем самым они не противоречат наличию скачка плотности при этом давлении. Кривая сжатия, согласно работам [13, 23, 24], в районе ≈ 300 ГПа имеет особенность – до этого давления она относительно крутая, после чего имеет тенденцию к некоторому смягчению. То есть эти данные четко не подтверждают скачка плотности, но и не отрицают его.

Таким образом, на основе данных [6–8, 13, 23, 24, 26] можно говорить об изменении характера сжимаемости водорода в районе ≈ 300 ГПа.

В чем причина различий результатов [22] и [13, 23, 24], [26] при $P \approx 150$ ГПа (и более высоких давлениях)? На наш взгляд, она состоит в переоценке в [22] реальной точности определения размеров полостей (и, как следствие, плотности) по полученным в этих опытах изображениям. Они позволяют выявить положение границы газ–металл менее отчетливо, чем рентгенограммы, приводимые в работах [13, 23, 24, 26]. По оценкам [16],

погрешность регистрации плотности в опытах [22] при 150 ГПа составляет $\approx 15 \div 20$ %. Вряд ли при этом имеет смысл говорить о скачке плотности. Отсутствие уверенности в его наличии выражено в более поздней статье М. А. Мочалова и др. [31] следующим комментарием по теме скачка (с. 703): «Это сложная техническая и научная проблема, критерием истинности которой должен быть новый эксперимент на базе новой техники с иным разрешением, чем с ранее использованной аппаратурой».

Заключение

Результаты опытов по ударному сжатию изотопов водорода свидетельствуют об относительно плавном характере его сжимаемости с ужесточением ударной адиабаты после $\approx 35 \div 40$ ГПа. Данные по квазиизэнтропическому сжатию протия и дейтерия не отрицают возможности наличия особенности в поведении их сжимаемости в районе ≈ 320 ГПа. Для более четких выводов (скачок плотности на изэнтропической зависимости или ее относительно плавное террасовидное поведение) желательны более подробные исследования в диапазоне ≈ 300 – 400 ГПа.

Список литературы

1. Van Thiel 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. et al. // *J. Chem. Phys.* 1983. Vol. 79. P. 1480.
4. Da Silva I. B. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78. P. 483.
5. Collins G. W. et al. // *Science.* 1998. Vol. 281. P. 1178.
6. Григорьев Ф. В. и др. // *Письма ЖЭТФ.* 1972. Т. 16, № 5. С. 286.
7. Григорьев Ф. В. и др. // *ЖЭТФ.* 1975. Т. 69, № 2. С. 743.
8. Григорьев Ф. В. и др. // *ЖЭТФ.* 1978. Т. 75, № 5. С. 1683.
9. Копышев В. П., Урлин В. Д. *Ударные волны и экстремальные состояния веществ / Под ред. Фортова В. Е. и др. М.: Наука, 2000. С. 207.*
10. Альтшулер Л. В. и др. // *УФН.* 1996. Т. 166. С. 575.
11. Трунин Р. Ф. // *УФН.* 2001. Т. 171, № 4. С. 387.
12. Boriskov G. V. et. al. Megagauss magnetic fields and high tnergia liner technology. Proc. of the 2006 Int. Conf. on Megagauss magnetic fields generation and relat-cataway NJ USA // *IEEE.* 2007. P. 465.
13. Борисков Г. В. и др. // *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 1, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.*
14. Альтшулер Л. В. и др. // *ЖЭТФ.* 1958. Т. 34. Вып. 4. С. 886.
15. Трунин Р. Ф. и др. // *ЖТФ.* 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 90.
16. Трунин Р. Ф. и др. // *УФН.* 2010. Т. 180, № 6. С. 605.
17. Knudson V. D. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 87. P. 225501.
18. Knudson V. D. et al. // *Phys. Rev.* 2004. Vol. B69. P. 144209.
19. Hicks D. G. et al. // *Phys. Rev.* 2009. Vol. B79. P. 0141112.
20. Ильяев Р. И. и др. // *5-е Харитоновские чтения / Под ред. Михайлова А. Л. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.*
21. Ilkaev R. I. et al. // *AIP Conf. Proc.* 2004. Vol. 706. P. 73.
22. Fortov V. E. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99. P. 185001.
23. Boriskov G. V. et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2008. Vol. 121. P. 072001(9).
24. Boriskov G. V. et al. // *Contrib. Plasma Phys.* 2011. Vol. 51, N1. P. 339; Boriskov G. V. et al. *Ibid.* P. 333.
25. Павловский А. И. и др. // *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Тр. Третьей Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам / Под ред. Титова В. М., Швецова Г. А. М: Наука. 1984. С. 19.*
26. Жерноклетов М. В. и др. // *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 178.*
27. Аринин В. А. и др. // *11-е Харитоновские чтения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 791.*
28. Arinin V. A., Tkachenco V. I. *Pattern recognition and image analysis.* 2009. Vol. 19, N1. P. 63–68.
29. Аринин В. А. // *10-е Забабахинские чтения, Снежинск, 2010.*
30. Копышев В. П., Хрусталеv В. В. // *ПМТФ.* 1980, № 1. С. 122.
31. Мочалов М. А. и др. // *ЖЭТФ,* 2012. Т. 142. Вып. 4(10). С. 696.

Статья поступила в редакцию 30.01.14