

Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа

М. А. Мочалов¹⁾, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов⁺*, А. Л. Михайлов, Ю. М. Макаров, В. А. Аринин, С. К. Гришечкин,
А. О. Бликов, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, В. К. Грязнов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

⁺Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

*Институт проблем химической физики Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 8 июля 2010 г.

После переработки 28 июля 2010 г.

Приведены результаты измерения термодинамических свойств сильносжатой плазмы дейтерия с использованием взрывной сферической экспериментальной камеры. Эксперимент выполнен с использованием рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов, и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений процесса взрывного сферического сжатия дейтерия. При начальном давлении газообразного дейтерия $P_0 = 267$ атм и $T_0 = 10.5$ °С зарегистрирована плотность ударно-сжатой дейтериевой плазмы $\rho = (4,3 \pm 0,7)$ г/см³ при давлении $P = 1830$ ГПа. В этих условиях плазма является сильнонеидеальной ($\Gamma \sim 4.5 \cdot 10^2$) с вырожденной ($n\lambda_c^3 \sim 2.8 \cdot 10^2$) электронной компонентой и с числом электронов $\sim 2.8 \cdot 10^{23}$ см⁻³.

Введение. Использование экспериментальной техники мощных ударных волн для изучения экстремальных состояний вещества [1–3] является сегодня основным источником информации о поведении сильносжатой сильнонеидеальной плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарного-гигабарного диапазона [4–20]. Будучи экзотическими для земных условий, эти ультраэкстремальные состояния вполне характерны для большинства астрофизических объектов, определяя строение, эволюцию и светимость звезд, планет солнечной системы, а также около 400 открытых недавно экзопланет [1, 2].

Кроме того, с плазмой ультрамегабарного диапазона связываются перспективные энергетические проекты по управляемому термоядерному синтезу с инерционным удержанием плазмы [1, 2] и реализации высокотемпературных состояний в сжатом водороде [3]. Эти обстоятельства являются постоянно действующим стимулирующим фактором по экспериментальному изучению свойств сильносжатой неидеальной плазмы водорода, дейтерия и инертных газов мощными ударными волнами для возбуждения которых используются легкогазовые [9] и взрывные плоские и полусферические [4, 5, 8, 17, 18] устройства, мощные лазеры [13, 14] и электродинамические ускорители [15, 16].

Существенно большие давления, превышающие почти на порядок значения давлений однократно-

го ударно-волнового сжатия, при значительном снижении эффектов необратимого нагрева реализуются при квазиизэнтропическом сжатии веществ последовательностью падающих и отраженных ударных волн в устройствах плоской, цилиндрической и сферической геометрии [9–12, 19–20]. В опытах по этой методике достигнута плотность сжатого водорода ~ 2 г/см³ в области давлений до 800 ГПа [10, 11]. Результаты измерений [10, 11] в современной обработке приведены в [21], куда была включена еще одна экспериментальная точка при давлении 1300 ГПа. На базе экспериментальных данных [10, 11] было построено полуэмпирическое уравнение состояния (УРС) водорода [21, 22].

Метод квазиизэнтропического сжатия в цилиндрических устройствах был реализован при исследовании сжимаемости и другого класса веществ – плазмы исходно жидких аргона и ксенона [23, 24].

Сжимаемость газообразного дейтерия в устройствах цилиндрической геометрии измерена в работе [12]. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что в области давлений ~ 125 – 154 ГПа зарегистрирован скачок плотности дейтерия $\sim 20\%$, имеющий признаки фазового перехода, который в [12] связывается с плазменным фазовым переходом в сильнонеидеальной плазме [1].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по сжимаемости газообразного дейтерия при давлении 1800 ГПа в сферической конструкции [10, 11, 21], полученные на новой экс-

¹⁾ e-mail: root@gdd.vniief.ru

периментальной и диагностической базе с использованием значительно более совершенного рентгенографического комплекса, состоящего из трех рентгеновских установок и многоканальной электронно-оптической системы регистрации рентгеновских изображений.

Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия. Эксперименты настоящей работы являются логическим продолжением исследований сжимаемости водорода, начатых во ВНИИЭФ [10, 11]. Схема эксперимента по измерению сжимаемости газообразного дейтерия приведена на рис.1.

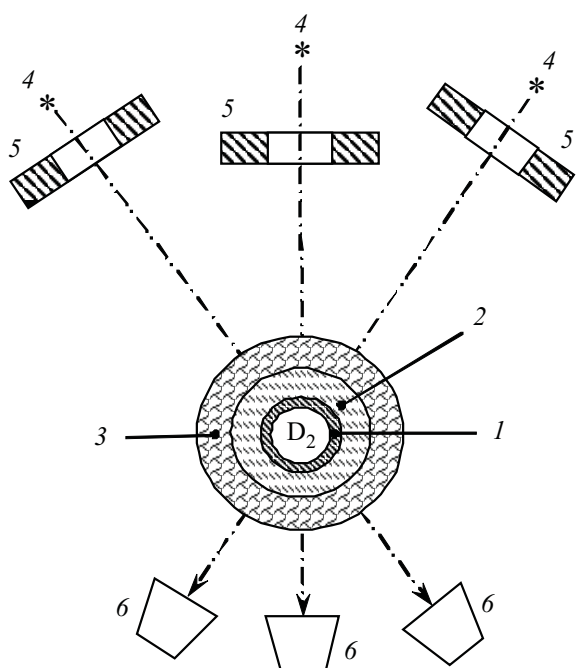


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – сферическая камера, 2 – прокладка (полиэтилен), 3 – блок ВВ, 4 – источники излучения, 5 – защитное устройство, 6 – электронно-оптические регистраторы

Детали экспериментального устройства описаны в [21]. Основу конструкции (рис.1), [7, 8], составляет, заполненная дейтерием сферическая камера из водородопрочной стали 1 с наружным диаметром 113 мм, окруженная прокладкой из полиэтилена 2. Для взрывного обжатия газа использован более мощный, чем в [10, 11], блок ВВ 3 на основе гексогена. Для заполнения сферической камеры нерадиоактивными изотопами водорода высокого давления использована система напуска, основу которой составляли термодесорбционные источники дейтерия [25]. Чистота газообразного дейтерия в эксперименте, измеренная с помощью хроматографической установки “Цвет-

800”, составляет $\sim 99.9\%$. Процесс заполнения сферической капсулы регистрировался в реальном времени. Температура газа контролировалась термодарой, расположенной на корпусе сферической камеры.

Взрывное обжатие дейтерия в данной конструкции осуществлялось системой сферически сходящихся ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и под действием стальной оболочки 1, сходящейся к центру. Этот процесс оказывается близким к квазиизэнтропическому, так как после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие газа происходит практически без его существенного нагрева и заметного набора энтропии.

Теневое изображение границ оболочки, сжимающей газообразный дейтерий, получено с одновременным использованием тормозного излучения трех мощных бетатронов 4 с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ [26]. Особенностью рентгенографического комплекса является возможность каждого излучателя работать в трехимпульсном режиме. При регистрации движения оболочки для каждого бетатрона используется индивидуальная оптико-электронная система регистрации 6 со следующими характеристиками: длительность кадра $0.2 \div 5$ мкс (с шагом 0,01 мкс); интервал времени между кадрами $0 \div 100$ мкс (с шагом 0,01 мкс); размер разрешаемого элемента по полю регистрации 0,15 мм; квантовая эффективность регистрации (10–40)%; динамический диапазон регистрации $\sim 10^3$. В качестве гамма-конверторов с размером рабочего поля до 150 мм в данной системе используются люминофоры со временем высвечивания 50 нс при максимуме излучения на длине волны 420 нм.

Использование новой экспериментальной техники позволяет за один эксперимент зарегистрировать девять фаз движения оболочки и проследить за динамикой процесса сжатия. Это снимает проблемы воспроизводимости опытов, чего невозможно добиться при использовании системы регистрации с применением рентгеновской пленки [10, 11].

Перед экспериментом выполнено макетирование устройства на момент максимального сжатия газа. В качестве модели использовался тест из сплава вольфрам-никель-железо (ВНЖ-95) со сферической полостью диаметром 20 мм, заполненной титаном, то есть материалом с плотностью, близкой к ожидаемой плотности сжатого дейтерия (~ 4 г/см³). В результате обработки полученного рентгеновского изображения макета по методике [27] определен размер вставки из титана $R = (10.01 \pm 0.042)$ мм, что хорошо согласуется с ее конструктивным размером $R = 10.00$ мм.

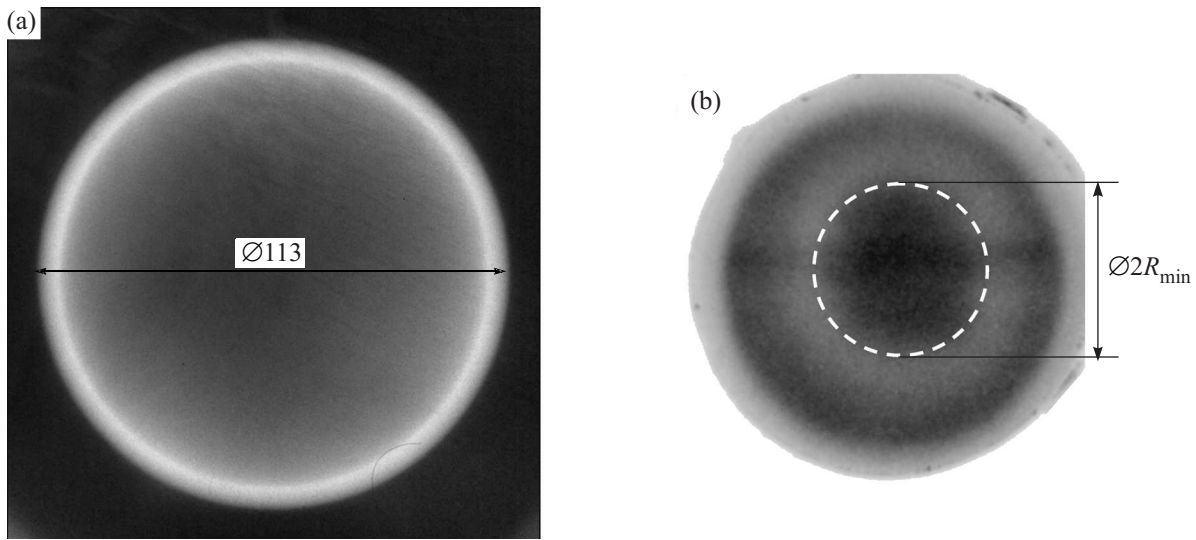


Рис.2. Рентгеновское изображение сферической оболочки с газообразным дейтерием (масштаб 1:1): (а) в исходном состоянии; (b) в момент максимального сжатия. Пунктиром показан результат обработки полученного изображения

Рентгеновское изображение сферической камеры, зарегистрированное в эксперименте на момент максимального сжатия, показано на рис.2. Там же приведено рентгеновское изображение оболочки в исходном состоянии (рис.2а). Начальные параметры газообразного дейтерия в этом эксперименте составляли: давление $P_0 = 267$ атм при температуре $T_0 = 10.5$ °С. При таких начальных условиях плотность газообразного дейтерия в исходном состоянии составляет $\rho_0 = 0.04$ г/см³. В результате обработки изображения, приведенного на рис.2b, определен радиус сжатого дейтерия $R_{\min} = (1.07 \pm 0.06)$ см и вычислена средняя плотность сжатого газа $\rho = \delta \cdot \rho_0 = (4.3 \pm 0.7)$ г/см³. Здесь $\delta = (R_0/R_{\min})^3$, где R_0 – радиус внутренней границы сферической оболочки в исходном состоянии, ρ_0 – начальная плотность газа.

Ввиду трудностей прямого измерения давления в ударно-сжатой плазме в наших опытах, давление в плазме определяется из газодинамических расчетов с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментального устройства. Газодинамический расчет данной конструкции был проведен по одномерной программе [28], из которого получены $R(t)$ -диаграммы движения границ сферического устройства и распределение давления в плазме по радиусу полости на момент максимального сжатия. Как и в [12], в расчетах учитывалась откольная и сдвиговая прочность для металла, из которого изготовлена сферическая камера. Для дейтерия использовалось уравнение состояния из работы [22].

Сравнение рассчитанной $R(t)$ -траектории и экспериментальных данных показано на рис.3. Как вид-

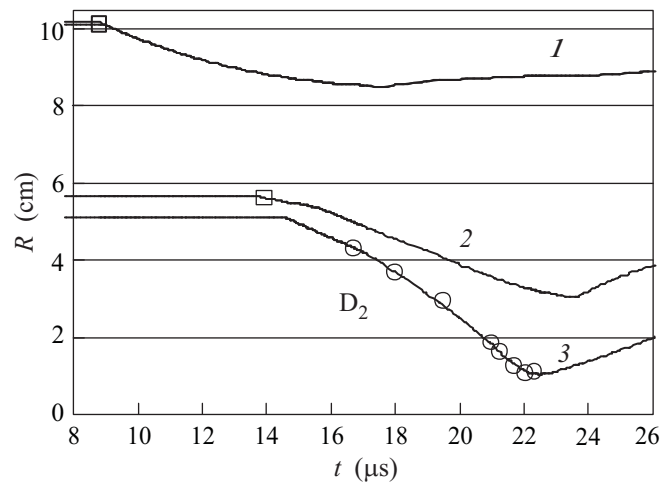


Рис.3. $R(t)$ -диаграммы движения границ экспериментального устройства. Эксперимент: \square – электроконтактные измерения движения ударной волны; \circ – результаты гаммаграфирования полости оболочки; расчет $R(t)$ траекторий: 1 – полиэтиленовая оболочка; 2 – внешняя граница стальной камеры; 3 – внутренняя граница

но из рисунка, согласие рассчитанных и экспериментальных данных хорошее, что и позволяет использовать результаты расчета для оценки давления сжатой плазмы. Распределение давления по радиусу, полученное в газодинамическом расчете с учетом прочности оболочки, показано на рис.4. Как

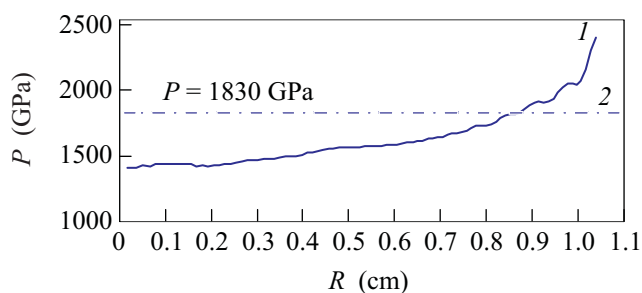


Рис.4. Распределение давления в сжатом дейтерии по радиусу сферы в момент максимального сжатия – 1; средневзвешенное по массе давление – 2

видно из рисунка, средневзвешенное по массе давление в сжатом газообразном дейтерии составляет $P \approx (1830 \pm 400)$ ГПа, что практически в 1.5 раза превосходит данные, полученные ранее во ВНИИЭФ.

Результат настоящей работы в координатах давление-плотность приведен на рис.5. Там же при-

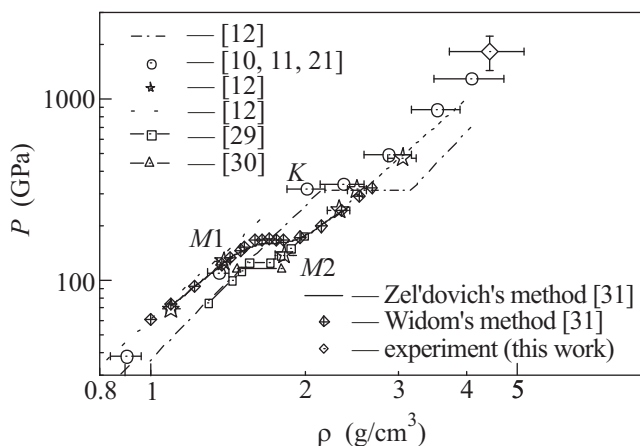


Рис.5. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 1800 ГПа: 1 – [22], 2 – [10, 11, 21], 3 – [12], 4 – [12], 5 – [29], 6 – [30], 7 – [31]. Экспериментальная плотность из [10, 11, 21] при переходе от водорода к дейтерию удвоена

ведено сопоставление результатов экспериментов с рядом теоретических моделей. Видно, что развитая нами ранее “химическая” модель сильнонеидеальной плазмы [4, 12] разумно описывает полученный экспериментальный материал по квазиadiaбатическому сжатию плотной плазмы дейтерия, вплоть до достигнутых нами рекордных давлений 1830 ГПа при умеренных температурах $T \sim 3.5 \cdot 10^3$ К. Важно отметить, что реализация в наших опытах сильных сжатий и умеренных разогревов позволила получить в плазме также рекордно высокие значения межчастичного взаимодействия – согласно модели [4, 12] отношение характерной энергии кулоновского

взаимодействия $e^2/r_D : r_D = \sqrt{kT/4\pi n_i z_i^2}$ к характерной кинетической энергии движения составляет $\sim 4.5 \cdot 10^2$. В условиях эксперимента ударно-сжатая плазма является сильновырожденной, $n_e \lambda_e^3 \sim 2.9 \cdot 10^2$ ($\lambda_e \approx \sqrt{\hbar^2/2m_e kT}$ – тепловая дебройлевская длина волны электрона) ввиду высокой электронной концентрации плазмы дейтерия $n_e \sim 2.8 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ (степень ионизации $n_e/n_a + n_i \sim 0.2$). Внутренняя энергия дейтериевой плазмы в этих условиях составляет $\sim 1 \text{ МДж/см}^3$, что в ~ 100 раз превосходит удельную энергию химических конденсированных ВВ.

В ближайшее время мы планируем продолжить экспериментальные исследования свойств неидеальной плазмы дейтерия в экзотических условиях такого рода; уточнить сжимаемость дейтерия в условиях экспериментов из работ [10] (точка K на рис.5) и [12] (точки M1 и M2 на рис.5) на базе современной техники регистрации и обработки рентгеновских изображений, которая по своим возможностям превосходит технику, использованную ранее.

Настоящая работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физики сильносжатого вещества” и Российского фонда фундаментальных исследований (проект # 10-02-01233).

1. В. Е. Фортов, *Экстремальные состояния вещества*, М.: Физматлит, 2009.
2. *Frontiers in High Energy Density Physics*, Ed. D. Henderson, Washington, National Research Council. Nat. Acad. Press, 2003.
3. N. W. Ashcroft, in *High Pressure Phenomena*, Eds. R. Y. Hemley et al. Amsterdam: IOS Press, 2002, p.151.
4. В. Е. Фортов, В. Я. Терновой, М. В. Жерноклетов и др., *ЖЭТФ* **124**, 288 (2003).
5. С. К. Гришечкин, С. К. Груздев, В. К. Грязнов и др., *Письма в ЖЭТФ* **80**, 452 (2004).
6. J. Eggert, S. Brygoo, P. Loubeure et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 124503 (2008).
7. D. G. Hicks, T. R. Rochly, P. M. Celliers et al., *Phys. Rev. B* **79**, 014112 (2009).
8. S. T. Weir, A. C. Mitchell, and W. J. Nellis, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1860 (1996).
9. W. J. Nellis, *Rep. Progr. Phys.* **69**, 1195 (2006).
10. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., *Письма в ЖЭТФ* **16**, 286 (1972).
11. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова и др., *ЖЭТФ* **75**, 1683 (1978).
12. V. E. Fortov, R. I. Ilkaev, V. A. Arinin et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 185001 (2007).

13. L. B. Da Silva, P. Celliers et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 483 (1997).
14. G. W. Collins, L. B. Da Silva et al., Science. **281**, 1178 (1998).
15. M. Knudson, D. Handson et al., Phys. Rev. B **69**, 144209 (2004).
16. M. Knudson, D. Handson et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 035505 (2003).
17. G. V. Boriskov, A. I. Bykov et al., Phys. Rev. B **71**, 092104 (2005).
18. Р. Ф. Трунин, В. Д. Урлин, А. Б. Медведев. УФН **180**, 605 (2010).
19. Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров и др., В сб. *X Харитоновские научные чтения*, под ред. С. Г. Гаранина, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008, с.281.
20. Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров и др., В сб. *XI Харитоновские научные чтения*, под ред. А. Л. Михайлова, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с.771.
21. В. П. Копышев, В. Д. Урлин, *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*, под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова, М.: Изд. Наука, 2000, с.297.
22. В. П. Копышев, В. В. Хрусталева, ПМТФ №1, 122 (1980).
23. В. Д. Урлин, М. А. Мочалов, О. Л. Михайлова, ЖЭТФ **111**, 2099 (1997).
24. В. Д. Урлин, М. А. Мочалов, О. Л. Михайлова, ТВТ **38**, 227 (2000).
25. В. А. Голубев, В. Д. Заграй, В. И. Соцков, В. Ф. Ходаев, Патент России №2155156, 7С 01 В 3/00 от 18.01.99, Бюл. № 24 от 27.08.2000 г.
26. Yu. P. Kuropatkin et al., In: 11th IEEE Pulsed Power Conference/ Digest of technical papers, Eds. G. Cooperstein and I. Vikovitsky, 1997, p. 1663.
27. В. А. Аринин, Цифровая обработка сигналов №2, (2006).
28. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, Вопросы атомной науки и техники, Сер.: *Методики и программы численного решения задач математической физики*, **3**, 11 (1982).
29. S. Scandolo, Ac. Sci. **100**, 3051-3 (2003).
30. D. Beule, W. Ebeling, A. Forster et al., Phys. Rev. B **59**, 14177 (1999).
31. V. S. Filinov, P. R. Levashov, A. V. Botan et al., J. Phys. A: Math. Theor. **42**, 214002 (2009).