

## Ударно-волновое сжатие водорода до давлений 65 ГПа

Р. Ф. Трунин<sup>1)</sup>, Г. В. Борисков, С. И. Белов, А. И. Быков, Р. И. Илькаев, Г. В. Симаков, В. Д. Урлин, А. Н. Шуйкин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики  
607190 Саров, Нижегородская обл., Россия

Поступила в редакцию 8 июля 2005 г.

Приведены результаты экспериментального определения ударного сжатия исходно твердого водорода (протия) в интервале давлений от 17 до 66 ГПа. Данные получены с использованием зарядов взрывчатых веществ сферической геометрии. Давления в образцах создавались ударом стального ударника, разогнанного до максимальных скоростей в 23 км/с. Перевод газообразного протия в твердое состояние осуществлялся с помощью специальной криогенной системы охлаждения.

PACS: 51.35.+a, 52.35.Tc

Интерес к исследованию поведения исходно твердого водорода (протия) под действием высоких давлений и температур вызван рядом обстоятельств. Среди них следует отметить, прежде всего, изучение строения звезд и планет-гигантов Солнечной системы, проблем, связанных с осуществлением управляемого термоядерного синтеза и получением металлического водорода, многих задач прикладного характера. Однако в силу ряда причин в России исследования ударно-волнового сжатия протия не проводились. В США были получены данные по ударному сжатию жидкого (в исходном состоянии) протия до давлений в 15 ГПа [1–3]. Исследования выполнены с использованием измерительных систем на основе взрывчатого вещества (ВВ) и двухкаскадных легкогазовых пушек.

Водород, являющийся веществом с простейшей одноэлектронной структурой, в принципе позволяет проведение прямых расчетов высокоплотных и высокотемпературных плазменных состояний исходя из первых принципов, минуя полуэмпирические подходы. К сожалению, до сих пор результаты теоретических работ расходятся между собой, что связано, прежде всего, с трудностями корректного учета сильного межчастичного взаимодействия в этих условиях.

Поэтому получение надежных экспериментальных данных о сжатии водорода в неисследованной области состояний должно явиться не только определенным стимулом для проведения более глубоких теоретических исследований этого вопроса, но и тестовым материалом для проверки теоретических предположений.

Напомним также результаты недавних исследований сжимаемости жидкого дейтерия [4, 5], в которых получены его аномально большие плотности. Многочисленные сомнения в этих результатах потребовали проведения серий исследований [6–9], которые, в конечном итоге, опровергли данные [4, 5]. Настоящая работа является продолжением этих серий опытов.

Наконец, укажем на открывающуюся перед экспериментаторами возможность исследований, на примере изотопов водорода, вопросов диссоциации молекул и ионизации атомов при тех высокотемпературных состояниях, что реализуются в условиях воздействий на исследуемые образцы ударных волн мегабарных амплитуд.

Задачей настоящей работы являлось, прежде всего, максимальное продвижение в область высоких давлений, существенно превосходящих по своим значениям существующие [1–3] данные. То, что в отличие от американских наши измерения проведены на твердом (в исходном состоянии), а не жидком протии – ввиду близости свойств этих фаз – не является существенным. Более того, результаты позволяют осуществлять их взаимный пересчет. Заметим, что публикаций по ударно-волновому сжатию твердого протия до сих пор нигде не было.

Эти исследования были начаты у нас в 2002 г. и выполнялись параллельно с аналогичной работой по жидкому и твердому дейтерию [7, 9]. В качестве инструмента для создания мощных ударных волн использовался полусферический заряд ВВ, одновременно инициируемый по всей внешней сферической поверхности [10]. Продукты взрыва сходящейся детонационной волны ускоряют стальной ударник, расположенный с небольшим воздушным зазором относительно внутренней полости ВВ, к центру системы. Его скорость на радиусе соударения меняется от 9 до

<sup>1)</sup>e-mail: root@gdd.vniief.ru

Скорость ударной волны $D$ , км/с	Массовая скорость $U$ , км/с	Давление $P$ , ГПа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
$31.30 \pm 0.30$	$23.82 \pm 0.30$	$65.6 \pm 1.0$	$0.368 \pm 0.030$
$22.20 \pm 0.50$	$16.43 \pm 0.30$	$32.1 \pm 0.9$	$0.339 \pm 0.030$
$16.67 \pm 0.30$	$11.59 \pm 0.20$	$17.0 \pm 0.3$	$0.289 \pm 0.020$

23 км/с в зависимости от выбранного измерительного устройства и радиуса измерений (радиуса расположения образцов). Проведено три серии опытов, отличающихся друг от друга геометрией измерительных устройств: радиусами ВВ и ударников, их толщиной, радиусами расположения исследуемых образцов и прикрывающих их полусферических алюминиевых экранов. Толщина  $\Delta R$  образцов протия везде была одинаковой и составляла 4 мм, толщина экранов составляла 4–5 мм.

Каждая серия состояла из четырех независимых опытов с тремя независимыми определениями волновой скорости в каждом из них.

Экспериментально определялось время прохождения ударных волн  $\Delta\tau$  по толщине образца  $\Delta R$ . Регистрация времени осуществлялась с использованием электроконтактных датчиков с записью интервалов времени на осциллографах TDS и HP54645 с погрешностью в 2 нс. Итоговыми данными являлись усредненные результаты измерения скоростей ударной волны  $D = \Delta R / \Delta\tau$  в данной серии опытов.

Для определения массовых скоростей использовался метод отражения [11], в соответствии с которым по известным состояниям в А1 экране (они были определены в предварительной серии экспериментов) и полученной в опытах средней волновой скорости  $D_{av}$  давление ударного сжатия  $P$  и массовая скорость движения вещества за фронтом волны  $U$  определяются точкой пересечения волнового луча  $\rho_0 D_{av}$  и энтропы расширения А1 из состояний на его ударной адиабате (в данном случае на адиабате “холодного”,  $T \sim 10$  К, алюминия). Эта энтропа рассчитывалась по уравнению состояния алюминия типа, рассмотренного в [12, 13], откорректированного по данным [14]. Предварительно было показано преимущество этого уравнения в описании известных экспериментальных данных по алюминию (относящихся к интересующему нас интервалу давлений) по сравнению с другими, известными авторам, уравнениями состояний. Энергия и плотность ударного сжатия находились с использованием соотношений, следующих из законов сохранения.

Контроль начального состояния образца осуществлялся по показаниям термометров полупроводникового типа, устанавливаемых в зоне расположения образцов, где проходила конденсация водорода. Охлаж-

дение этой зоны проводилось путем подвода к ней по специальной системе трубопроводов паров или непосредственно жидкого гелия. При этом система позволяла проводить дозированный (и регулируемый) подвод гелия к охлаждаемой ячейке, содержащей первоначально газообразный протий [7, 9]. При достижении температуры сжижения протия (24 К) происходила его конденсация, о чем наглядно свидетельствовало резкое уменьшение объема газольдера, содержащего исходный газ. После выдержки протия в течение 5–10 мин в жидком состоянии, проводилось дальнейшее снижение температуры охлаждаемого образца и перевод его в твердое состояние (температура  $< 19$  К). Спустя еще 5–10 мин, проводился подрыв экспериментального устройства.

Сходящаяся ударная волна в экране и исследуемом образце не стационарна и при определении параметров сжатия приходится вводить небольшие ( $\leq 1\%$ ) поправки в волновые скорости, учитывающие это обстоятельство. Окончательные результаты приведены в таблице.

Исходная плотность твердого протия  $\rho_0 = 0.088$  г/см<sup>3</sup>. Ошибка в волновой скорости соответствует среднеквадратичной погрешности среднего арифметического, ошибка в массовой скорости – максимальной погрешности в  $U$ , получаемой при пересечении энтропы расширения алюминия с двумя крайними волновыми лучами протия, отвечающими ошибкам

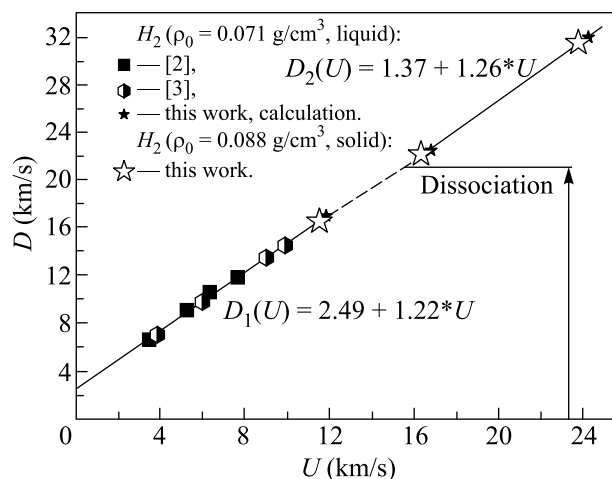


Рис.1. Данные по протию в  $D-U$ -координатах

в  $D$ . Соответствующие погрешности в давлении, плотности и сжатии определяются через погрешности кинематических параметров.

На рис.1 наши данные приведены в  $D-U$ -координатах. Естественно, что они отличаются от данных [1–3], относящихся к жидкому исходному протию. Для их корректного сопоставления пересчитаем полученные здесь результаты на исходную плотность жидкости ( $0.071 \text{ г/см}^3$ ). Для этого будем полагать зависимость  $D(\rho_0)$  в протии и дейтерии для каждого из трех используемых здесь устройств линейной. Как следует из анализа данных по сжатию металлических элементов, в рамках строгого соблюдения условий постановки опытов, которые в данном случае выполняются, такое допущение разумно. Соответствующее положение пересчитанных точек показано на рисунке. Видно удовлетворительное согласие наших и американских результатов. Можно констатировать, тем самым, что потолок обследованных давлений для протия поднят, по сравнению с существующими данными, в 6 раз.

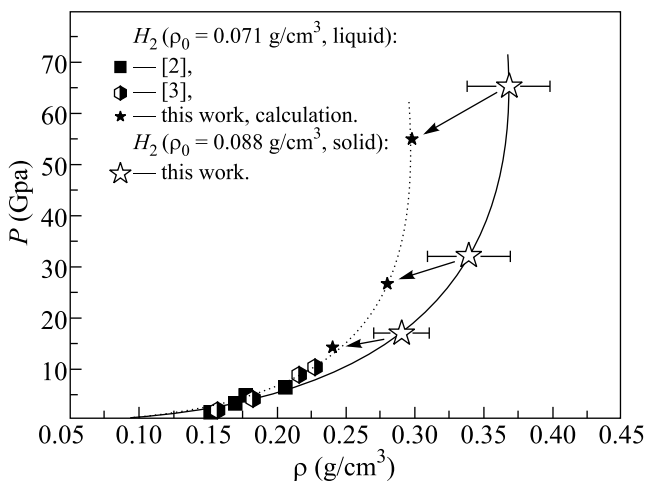


Рис.2. Данные по протию в  $P-\rho$ -координатах

Отметим следующее обстоятельство. Наклон адиабат и твердого, и жидкого водорода в области  $D > 20 \text{ км/с}$  ( $P \approx 30 \text{ ГПа}$ ) близок между собой и составляет  $s = dD/dU \approx 1.26$ . Этой величине отвеча-

ет предельное сжатие  $\rho_{\text{lim}}/\rho_0 = s/(s-1) \approx 4.85$ , что соответствует разумной величине показателя адиабаты одноатомного идеального газа. Возможно, это является указанием на завершение при этих давлениях диссоционных процессов, происходящих при ударно-волновом сжатии двухатомного протия.

На рис.2 полученные результаты представлены в  $P-\rho$ -координатах. Крутой участок адиабаты протия близок, по сжатию, к предельным состояниям и, как и данные [6–9], не приводит к аномально большой величине плотности ударного сжатия, зафиксированного в экспериментах на жидком дейтерии [4, 5].

1. L. M. van Thiel and B. J. Alder, *Mol. Phys.* **10**, 427 (1966).
2. R. D. Dick and G. I. Kerley, *J. Chem. Phys.* **73**, 5264 (1980).
3. W. J. Nellis, A. C. Mitchell, M. van Thiel et al., *J. Chem. Phys.* **79**, 1480 (1983).
4. L. B. Da Silva, P. Celliers, G. W. Collins et al., *Phys. Rev. Lett.* **78**, 483 (1997).
5. G. W. Collins, P. Celliers, L. B. Da Silva et al., *Phys. Plasmas* **5**, 1864 (1998).
6. M. D. Knudson, D. L. Hanson, J. E. Bailey et al. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 225501 (2001).
7. С. И. Белов, Г. В. Борисков, А. И. Быков и др., *ДАН* **392**, 755 (2003).
8. M. D. Knudson, D. L. Hanson, J. E. Bailey et al., *Phys. Rev. B* **69**, 144209, (2004).
9. С. И. Белов, Г. В. Борисков, А. И. Быков и др., *Письма в ЖЭТФ* **76**, 508 (2002).
10. Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, К. К. Крупников и др., *УФН* **166**, 575 (1996).
11. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник, *ЖЭТФ* **34**, 886 (1958).
12. С. Б. Кормер, А. И. Фунтиков, В. Д. Урлин и др., *ЖЭТФ* **42**, 626 (1962).
13. В. Д. Урлин, *ЖЭТФ* **49**, 485 (1965).
14. Р. Ф. Трунин, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, Г. В. Симаков, *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*, Сборник под ред. Р. Ф. Трунина, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2001.