

Ударно-волновое сжатие твердого дейтерия

С. И. Белов, Г. В. Борисков, А. И. Быков, Р. И. Илькаев, Н. Б. Лукьянов, А. Я. Матвеев, О. Л. Михайлова,
В. Д. Селемир, Г. В. Симаков, Р. Ф. Трунин, И. П. Трусов, В. Д. Урлин, В. Е. Фортвов, А. Н. Шуйкин

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

Поступила в редакцию 17 июня 2002 г.

После переработки 10 сентября 2002 г.

Приведены экспериментальные данные по сжатию твердого дейтерия при давлениях ~ 60 ГПа, полученные на взрывном генераторе сферически сходящихся мощных ударных волн. Полученные результаты сопоставляются с данными ударно-волновых экспериментов на лазерной установке *Nova* и на электродинамической установке EPBF-Z.

PACS: 07.35.+k, 62.50.+p

Поведение водорода в условиях экстремально высоких давлений и температур всегда представляло повышенный интерес с принципиальной точки зрения, а также для многочисленных приложений. Дело в том, что сильносжатая плазма водорода – наиболее распространенного состояния вещества в природе – определяет структуру и эволюцию звезд и планет-гигантов Солнечной системы, а с сжатием его изотопов до сверхвысоких давлений связываются надежды на осуществление управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием и на получение высокотемпературного сверхпроводника – металлического водорода. Несмотря на предельно простую одноэлектронную структуру, теоретические предсказания относительно поведения водорода в мегабарном диапазоне давлений характеризуются значительной неопределенностью, что вызвано принципиальными трудностями корректного учета сильного межчастичного взаимодействия, а также сложностями учета эффектов вырождения в сильнонеидеальной плазме конденсированных плоскостей. Интересно, что ряд теоретических моделей в области экспериментально высоких температур и давлений мегабарного диапазона теряют термодинамическую устойчивость, что связывается с “плазменным” фазовым переходом и в свою очередь стимулирует экспериментальные исследования в этой области параметров.

Экспериментальное изучение водорода при высоких давлениях и температурах также сопряжено с трудностями, вызванными его высокой подвижностью, сжимаемостью и низким молекулярным весом, затрудняющим генерацию высоких температур методами физики мощных ударных волн. Поэтому продвижение вверх по шкале динамических давлений требует применения наиболее совершенных методов

возбуждения мощных ударных волн, а надежность полученных результатов сейчас не слишком высока. Так, результаты измерений ударной адиабаты жидкого действия, полученные с использованием лазерных ударных волн [1], свидетельствуют о чрезвычайно высокой и труднообъяснимой теоретическими моделями сжимаемости плазмы, что не получило последующего экспериментального подтверждения в опытах по электродинамическому ударно-волновому сжатию [2].

Работа по измерению ударной сжимаемости дейтерия с использованием мощных сферически сходящихся ударных волн, возбуждаемых детонацией конденсированных ВВ, была начата в 1998 г. Из возможных установок, пригодных для решения вопроса, выбрана взрывная система, в которой осуществляется ускорение продуктами взрыва сходящейся детонационной волны тонкостенной стальной оболочки до скоростей в 9–23 км/с [3]. Удар такой оболочки по образцу дейтерия создает в нем состояния, близкие к тем, что получены на лазерной установке *Nova* [1]. Схема измерительного узла приведена на рис.1. Использовался стандартный метод отражения [4], в соответствии с которым для определения параметров сжатия исследуемого вещества необходимо знать скорость ударной волны в нем и параметры проходящей волны в материале экрана, прикрывающего образец. Диапазон достигаемых давлений определяется в сферической системе радиусом расположения образца: чем меньше радиус, тем больше давление в нем.

На первом этапе работ выбран средний радиус расположения образцов (радиус измерений), равный 17.6 мм, который соответствует скорости движения стальной оболочки, равной 12.9 км/с. Принят стандартный вариант расположения образцов; для регист-

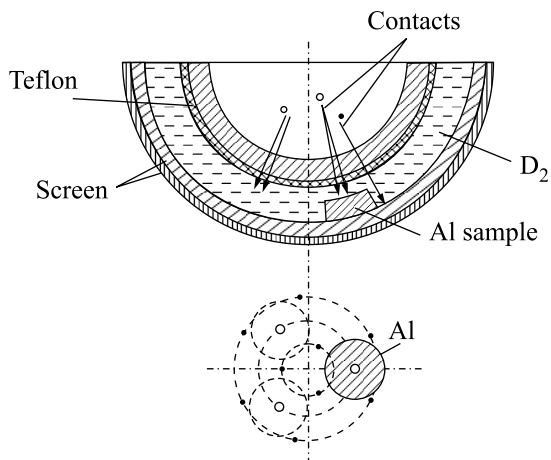


Рис.1. Схема измерительного сердечника и расположения исследуемых образцов. В нижней части рисунка показано расположение электроконтактных датчиков: ●, ○ – датчики соответственно нижнего и верхнего уровней

рации времени движения ударной волны по образцам использовались электроконтактные датчики. В каждом измерительном устройстве для определения скорости ударной волны располагалось по три образца: – контрольная из алюминия (материал экрана) и две из дейтерия. Измерительная база образцов составляла 4 мм, что в десятки раз превосходило толщины мишеней в лазерных опытах [1]. Это снимает вопросы, связанные с возможной неравномерностью регистрируемых состояний (в [1] толщины образцов составляли около сотни микрон), увеличивает точность и надежность измерений. Тем не менее, исходя из реально существующей асимметрии (отклонения от сферического движения) ударной волны в образцах, для получения результатов с требуемой точностью ($\sim 1\%$ по волновым скоростям) было проведено 4–6 опытов при 8–10 независимых регистрациях в каждом из них.

Подчеркнем, что использованные в данной работе сферические генераторы мощных ударных волн и методика фиксации скоростей ударных волн и контактных поверхностей прошла детальную проверку и широко применялась в России для определения ударной сжимаемости широкого круга веществ в мегабарном диапазоне динамических давлений (см. [3] и содержащиеся там ссылки).

Хотя сферические взрывные системы являются прямым и наиболее надежным способом проверки существующих экспериментальных данных, использование этих систем сопряжено с весьма значительными трудностями, преодоление которых априори было не очевидным. Основные из них следующие: 1) необходимость отработки технологии удержания дейте-

рия в капсуле измерительного устройства в жидком (или твердом) “невозмущенном” состоянии вплоть до прихода на образец ударной волны (> 10 мин); 2) надежное срабатывание измерительных датчиков в условиях низких температур ~ 10 –18 К.

Кроме того, интерпретация данных в сферических системах осложнена необходимостью введения в экспериментальные результаты расчетных поправок, связанных со спецификой нестандартного “схлопывания” ударной волны в исследуемых материалах и отличиями температурных условий проведения опытов от стандартных.

В специальных исследованиях все методические вопросы были решены. Однако в процессе обработки технологии получения конденсированного дейтерия из газовой фазы оказался более простым методом перевод газа в твердое состояние и удержание его в замороженном виде в течение необходимого времени. Поэтому параллельно с отработкой технологии удержания дейтерия в жидком состоянии было решено первые измерения провести на твердой фазе. При этом предполагается, что результаты измерений на обеих фазах должны быть близки друг другу. Контроль за агрегатным состоянием дейтерия осуществляется с помощью градуированных температурных датчиков, установленных в различных точках рабочего объема ($V \sim 10$ см³).

Предварительные результаты полученных измерений были сообщены на VI Забабахинских научных чтениях в г.Снежинске [5]. Заметим, что они практически не отличаются от данных настоящей работы, которые включают в себя дополнительные измерения.

После доклада в Снежинске стали известны новые данные измерений ударного сжатия жидкого дейтерия группой исследователей из Сандийской лаборатории (США) [2]. В качестве энергетического источника в работе [2] использовано сильное магнитное поле, которое разгоняло алюминиевую фольгу, – ударник (толщиной 200–300 мкм) – до скорости свыше 20 км/с, удар которого по исследуемому образцу создавал в нем ударные волны с амплитудой до 70 ГПа. Эти результаты представлены на рис.2. Видно, что данные работы [2] противоречат данным [1], хотя погрешность определения параметров в этой работе, на что указывают и сами авторы, достаточно велика.

В методе отражения принципиальным фактором, влияющим на точность определения давления и плотности в сжатом исследуемом веществе, является знание ударной адиабаты и энтропии разрешения, или уравнения состояния, материала, из которого изготовлен экран. В наших экспериментах экран был

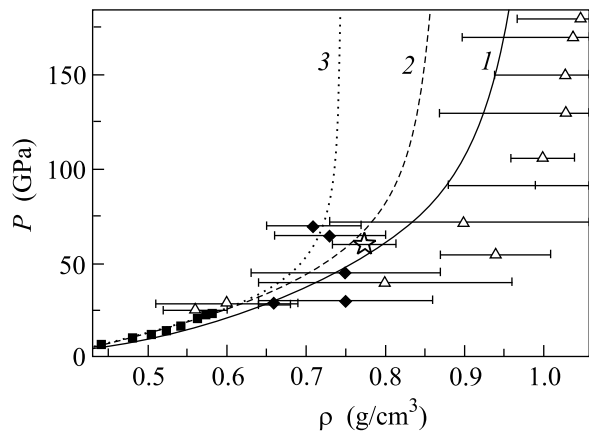


Рис. 2. P – ρ -диаграмма ударного сжатия дейтерия. Эксперимент: \star – настоящая работа (твердая фаза); \triangle , \blacksquare , \blacklozenge – соответственно данные [1], [9] и [2] (жидкая фаза). Расчетные ударные адиабаты: 1 – для твердого ($\rho_0 = 0.119$ г/см³) и 2 – для жидкого D₂ ($\rho_0 = 0.171$ г/см³) по уравнению состояния из [7], 3 – для жидкого D₂ по уравнению состояния Sesam [2]

алюминиевым. В расчетах было использовано уравнение состояния жидкой фазы [6] алюминия. Это уравнение хорошо описывает существующие термодинамические параметры и его экспериментальную ударную адиабату до 1000 ГПа. Расчетная ударная адиабата практически совпадает в области до 500 ГПа с опубликованной в [2] изэнтропой.

По нашему уравнению состояния Al его плотность при нормальных условиях (300 К) $\rho_0 = 2.71$ г/см³ и при $T = 10$ К $\rho_0 = 2.74$ г/см³. По уравнению состояния твердого дейтерия [7] его плотность при $T + 10$ К $\rho_0 = 199$ г/см³.

В проведенной в настоящей работе серии из 5 опытов средние значения локальных (мгновенных) скоростей ударной волны (непосредственные измерения) после введения в них необходимых поправок составили: для алюминия $D = 16.39 \pm 0.10$ км/с, $U = 8.53$ км/с, $P = 383$ ГПа ($\rho_0 = 2.74$ г/см³); для дейтерия $D = 20.3 \pm 0.2$ км/с, чему при построениях на P – U -диаграмме соответствует $U = 15.08$ км/с и $P = 60.9$ ГПа. Плотность ударного сжатия составляет $\rho = 0.774 \pm 0.040$ г/см³ ($\rho_0 = 0.199$ г/см³).

Полученная экспериментальная точка приведена на рис. 2. Для иллюстрации на этом рисунке также приведены расчетные ударные адиабаты твердого и

жидкого дейтерия по уравнению состояния из [7] и жидкого дейтерия по уравнению состояния Scsame [8]. Положение полученной точки соответствует продолжению экспериментальной ветви адиабаты жидкого дейтерия из [9] и не подтверждает данных [1]. Однако следует отметить, что измеренные параметры относятся к твердому дейтерию и, в принципе, могут при переходе к жидким состояниям изменить свои значения. Такое предположение основано, в частности, на том, что полученная экспериментальная точка находится вблизи границы “раздела” двух ветвей адиабаты дейтерия, поэтому нельзя полностью исключить возможность качественного изменения параметров сжатия дейтерия при больших, мегабарных давлениях исследования. Авторы намерены провести эти измерения. Представляется, что именно эти эксперименты, которые будут проведены с использованием форсированных вариантов сферических установок и толщинами исследуемых образцов в несколько миллиметров, будут иметь решающее значение в вопросе о представительности данных, полученных в Ливерморской лаборатории.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 00-02-17505а).

1. I. Da Silva, P. Celliers et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 483 (1997).
2. M. D. Knudson, D. L. Hanson, J. E. Bailey et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 225501(4) (2001).
3. Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, К. К. Крупников, Н. В. Панов, УФН **166**, 575 (1996).
4. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник, ЖЭТФ **34**, 874 (1958).
5. С. И. Белов, Г. В. Борисков, А. И. Быков и др., Ударно-волновое сжатие твердого дейтерия, доклад, VI Заббахинские научные чтения, г. Снежинск, Россия, 2001.
6. В. Д. Урлин, В сб. Ударные волны и экстремальные состояния вещества, под ред. В. Е. Фортова и др., 2000, с. 255.
7. В. П. Копышев, В. Д. Урлин, В сб. Ударные волны и экстремальные состояния вещества, под ред. В. Е. Фортова и др., 2000, с. 297.
8. G. I. Kerley, Molecular Based Study of Fluids, ACS, Washington, DC, 1983, p. 107.
9. N. C. Holms, M. Ross, and W. J. Nellis, Phys. Rev. **B52**, 15835 (1995).