

СЖАТИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Р. Ф. ТРУНИН

В далекие 1960-е гг. мне на глаза попала статья американских ученых, исследовавших ударное сжатие жидкого водорода до давлений 10 ГПа (10 тыс. атм.). Давления в образцах создавались с помощью ударных волн в специальных устройствах, которые были и в нашей лаборатории. Более того, принципиально мы могли не только повторить, но и провести подобные исследования при давлениях, более чем в 10 раз превосходящих американские. Конечно, захотелось показать и наши возможности.

Главная трудность в проведении работы состояла в получении конденсированного (твердого или жидкого) изотопа водорода — протия (H_2) или дейтерия (D_2). Напомню читателю, что конденсированный водород получается из газовой фазы путем ее охлаждения до температуры ниже минус 250 °С. Нам же необходимо было не только сконденсировать газ, но и удержать его при этой температуре в течение 10–15 минут, необходимых для завершения подготовки опыта. Я уже не говорю о других технических и технологических трудностях, с которыми неизбежно пришлось бы столкнуться при исследовании ударного сжатия водорода. Пришлось отступить.

Примерно через 5 лет после этого в отделе, которым руководил С. Б. Кормер, сотрудники во главе с Ф. В. Григорьевым провели измерения так называемого квазиизэнтропического сжатия газообразного водорода (протия). Зависимость сжатия от давления была прослежена ими до гигантских давлений 1300 ГПа. При этом, в отличие от ударного способа, используемого американцами, в котором давление в исследуемом образце достигается при прохождении по нему одной ударной волны заданной амплитуды, в квазиизэнтропическом случае та же величина давления получается при сложении серии волн небольших амплитуд, последовательно проходящих по исследуемому образцу. В опытах использовался газ, закачанный в сферическую ампулу при достаточно высоких давлениях (вплоть до 2000 атм.). Для создания ударных волн использовался взрыв сферического заряда взрывчатого вещества, одновременно инициируемого по всей его поверхности. Образовавшиеся продукты взрыва «разгоняют» металлическую оболочку, которая, при своем движении к центру,

сжимает исследуемый протий. Процесс сжатия регистрировался рентгенографическим методом.

В отличие от ударно-волнового способа, в котором фиксируются скорость ударной волны и скорость движения вещества, позволяющие перейти к давлению и плотности сжатого газа, в рентгенографическом методе регистрируется лишь один параметр — плотность газа. Второй параметр — давление — берется из газодинамических расчетов процессов, происходящих при работе конструкции.

Но есть и преимущество этого способа — существенно меньший разогрев исследуемого образца при сжатии, что позволяет исследовать его состояния (при одинаковых с первым способом давлениях) при более высоких плотностях. Так что оба способа взаимно дополняют друг друга, а на время их сопоставления (середина 1970-х гг.) данные Кормера — Григорьева безусловно обладали большими преимуществами. Можно было и успокоиться.

Но время шло. В 1966 г. американские исследователи (Л. М. Ван Тил и др.) впервые опубликовали данные по ударно-волновому сжатию жидкого протия при давлениях 10 ГПа, а в 1973 г. та же группа опубликовала результаты по ударному сжатию жидкого дейтерия до 20 ГПа. В 1980 г. Р. Д. Дак и Г. Дж. Керли, а в 1983 г. В. Дж. Неллис увеличили давления до 23 ГПа. Наконец, в 1997 г. сотрудники Ливерморской национальной лаборатории Л. Б. Да Силва и др. довели потолок давлений при исследовании жидкого дейтерия до 200 ГПа! Но мало того, они обнаружили при давлениях около 50 ГПа скачок плотности при котором ее величина менялась (увеличивалась) в 1,4 раза!

Открытие американцев вызвало противоречивые мнения специалистов. Некоторые (например, известный американский физик Д. Неллис, академик В. Е. Фортов и др.) высказывали большие сомнения относительно этих результатов. С недоверием отнеслись к ним и сотрудники ВНИИЭФ, занимающиеся исследованиями уравнений состояния веществ. Не было известно подобных по величине скачков при сжатии элементов, хотя подавляющее большинство из них было исследовано и у нас, и за рубежом. Определенные вопросы были связаны и с тем,

что для создания сильных ударных волн американцы использовали мощную лазерную установку Nova. Было известно, что первые результаты по ударному сжатию, полученные с использованием лазерных систем на меди, характеризовались существенно большими, по сравнению с нашими системами, погрешностями, и были не совсем адекватны опубликованным в печати нашим и зарубежным результатам.

Конечно, захотелось проверить достижение американцев. По предложению В. Е. Фортובה, активно поддержанного академиком Р. И. Ильяевым, такая работа была начата у нас в институте в конце 1998 г. Как она начиналась, кто принял в ней наиболее активное участие, как решались вопросы финансирования (тогда уже произошла новейшая революция и экономика страны была почти разрушена), организация и взаимодействие привлеченных к работе сотрудников, наши неудачи и успехи и т. д. и т. п. — обо всем не расскажешь в короткой заметке. Если вдруг кого-то из читателей заинтересует более подробный рассказ об этих событиях — он может прочитать о них в моей книге «А годы летят. Непридуманные истории», Саров: ВНИИЭФ, 2009.

Скажу лишь, что несмотря на огромные трудности в финансировании работы, в поисках и поставках оборудования и материалов, изготовления необходимых узлов — это было замечательное время! Оно напоминало нам далекие годы «харитоновской власти», когда научные сотрудники института и их помощники в своей массе знали и понимали необходимость выполнения порученной им работы, когда на первом месте стояла творческая заинтересованность в ее результатах, а не деньги. Увы! Этого уже не вернуть. И именно поэтому так приятно вспомнить эти навсегда ушедшие времена.

Первый опыт был проведен 15 декабря 2000 г. Зима, снег, мороз, ночь. Все, кто работал на поле, у заряда и гелиевой системы охлаждения — продрогли «до костей». Все-таки мороз под 20 °С — это не шутки. Опыт проводили с твердым дейтерием. С ним, как нам казалось, чуть-чуть легче обеспечить нужный нам режим конденсации. Надо суметь плавно «войти» в температурный интервал жидкого дейтерия (примерно от 24 до 19 К), несколько минут (5–10) продержать его при этом режиме и только потом медленно снизить температуру еще на несколько градусов, переведя дейтерий в область твердой фазы. Затем надо еще выждать 15–20 минут, удерживая строго дозиро-

ванный подвод охладителя — гелия (дать жидкому дейтерию затвердеть), и только после этого можно проводить опыт, т. е. нажимать кнопку подрыва заряда. Операция по обеспечению необходимого режима охлаждения камеры с газообразным дейтерием — одна из самых ответственных и самых трудных в исполнении. По сути, она заканчивала все операции по монтажу измерительного устройства. Ее всегда проводил Г. В. Борисков — специалист высокого класса, ответственный человек и очень заинтересованный в качественном проведении опыта.

Ну, а после подрыва заряда... Дальше все вписываются глазами в экраны регистраторов, на временных развертках которых появляются отметки срабатывания наших датчиков. Все. Сигналы есть. Обычно уже по их расположению можно сделать предварительные выводы об измеренных параметрах ударных волн. Как правило, во всей серии этих опытов (а их проведено всего 24) больших неприятностей у нас не было (наверное, бог был милостлив к нам). Поэтому с опытного поля мы, как правило, уезжали с чувством удовлетворения от выполненной работы.

Так начинались и проводились наши опыты. Второй опыт мы провели только 17 февраля 2001 г. Могли бы и чуть раньше, да неудача с системой конденсации дейтерия заставила нас провести демонтаж всей взрывной установки и заново провести ее лабораторные проверки. Это потребовало затраты времени. И дополнительной нервозности. Зато результаты оказались хорошие, и теперь уже по двум опытам можно было надежно оценить параметры сжатия дейтерия — как раз при тех параметрах, где американцы обнаружили скачок плотности. Увы, никакого скачка там не было: кривая сжатия дейтерия соответствовала плавному изменению плотности. Помню, как наш директор, выслушав нас по результатам второго опыта, сказал: «Ну, так что? Американцы посрамлены? Так?».

Аппетит, как говорят, приходит во время еды. Освоив технику перевода дейтерия в твердое состояние, и используя появившиеся возможности (американцы приняли участие в финансировании наших исследований) было решено повторить работу с жидким дейтерием, а также провести подобные измерения и на основном изотопе водорода — протии (H₂).

В 2001 г. мы провели 7 опытов, из них 4 с твердым дейтерием и 3 с жидким. Опыты проводились при двух разных давлениях — примерно при 25 и 55 ГПа. Первая величина — «пристрелочная». Измерения здесь должны были пока-

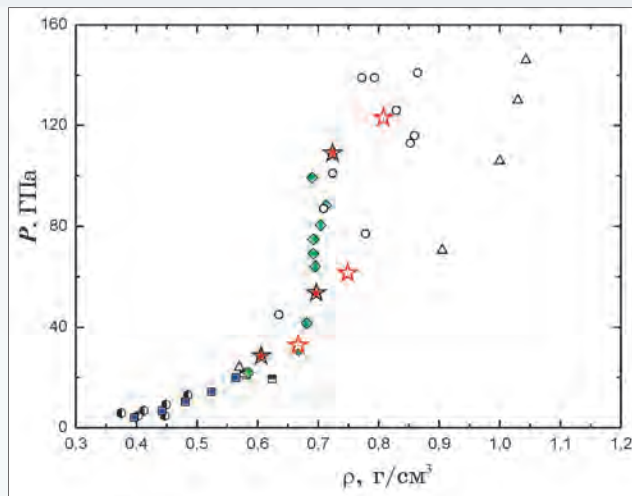
зять соответствие наших измерений существующим американским (что и было показано). Высокие давления должны были либо подтвердить, либо опровергнуть результаты, полученные на установке Nova, теперь уже окончательно, поскольку мы набрали солидную статистику совпадающих результатов и на твердом, и на жидком дейтерии. А она (статистика) однозначно указывала на отсутствие скачков плотностей, ошибочно обнаруженных исследователями США. О результатах исследований ударного сжатия твердого дейтерия мы рассказали в 2001 г. на 6-х Забабахинских чтениях у наших коллег в г. Снежинске.

В 2002 г. мы подчищали оставшиеся «хвосты» предыдущих измерений и выполнили основную программу по опытам с максимальными давлениями 120–130 ГПа. Кроме этого, мы начали исследовать и сжатие протия. Все опыты были завершены 12.10.04 г. В этот день был сделан последний опыт «водородной» серии.

Теперь о результатах аналогичных исследований наших коллег (М. Д. Кнудсон с сотрудниками) из Национальной лаборатории Сандия, США. У них была создана новая мощная установка, в которой плоские пластины-ударники разгоняются магнитным полем до скоростей, сопоставимых со скоростями на наших системах. Другими словами, их установка позволяла проводить измерения на дейтерии в том же диапазоне давлений, что и наши взрывные системы. И американцы прекрасно воспользовались этой возможностью!

Кнудсон начал свои исследования примерно в одно с нами время, примерно в одно время мы и они публиковали свои результаты (иногда они опережали нас на пару месяцев, иногда мы их). Примерно в одно время и мы, и они показали ошибочность данных, полученных коллегами из Ливерморской лаборатории. До первых публикаций ни они, ни мы не знали не только результаты, но и сам факт проведения соответствующих исследований. Таким образом, негласное соперничество оказалось не только независимым, но и весьма полезным и взаимодополняемым.

Тем не менее, хотелось бы отметить, что нам удалось при всех существующих трудностях и противодействиях за 4 года работы исследовать ударное сжатие не только жидкого и твердого дейтерия, но и твердого протия. Кнудсон работал только с жидким дейтерием. Здесь как не крути, а мы выполнили, по сравнению с американцами, существенно большую работу.



★, ★ — наши данные; Δ — L. B. Silva et al.; \blacksquare — W. J. Nellis et al.; \blacklozenge — M. D. Knudson et al.; \circ — D. G. Hicks et al.; \blacksquare — B. J. Alder, M. Van Thiel

Наконец скажем также несколько слов о недавних результатах Р. Хоука с сотрудниками, исследовавшими сжатие жидкого дейтерия на лазерной установке Omega (более мощной по сравнению с Nova) до давлений 230 ГПа. В сопоставимом с нами диапазоне давлений (до 130 ГПа) несмотря на значительный «разброс» в положении отдельных экспериментальных точек данные Хоука совпадают с нашими результатами и не подтверждают наличие скачка плотности, зафиксированного на установке Nova.

Для наглядности представим результаты, о которых шла речь, в координатах давление P (ось ординат) — плотность ρ (ось абсцисс) на рисунке. Видно, что измерения Nova на жидком дейтерии противоречат совокупности остальных данных. Не думаю, что сейчас найдутся желающие утверждать обратное и ратовать за скачок плотности при давлениях больших 40 ГПа.

Наша работа — коллективный труд многих сотрудников. Перечислять их — это занять еще одну-две страницы журнала. Но назвать хотя бы несколько фамилий от ведущих подразделений — ИФВ и НТЦФ совершенно необходимо. От ИФВ, по первой части работы: Г. В. Симков и А. Н. Шуйкин, от НТЦФ — А. И. Быков и Г. В. Борисков. Расчетную работу в этой части исследования проводил сотрудник ИТМФ В. В. Хрусталева.

ТРУНИН Рюрик Федорович — доктор физ.-мат. наук, лауреат Государственных премий и премии Правительства РФ