

34. H. Behrens, W. Struth, F. Wecken. Proc. X Internat. Symp. on Combustion, 1964.
35. Г. Г. Черный. В сб. Проблемы гидродинамики и механики сплошной среды. М. «Наука», 1969.
36. H. F. Lehr. Experimente zur stossinduzierten verbrennung in wasserstoff (luft- und wasserstoff) Sauerstoff — Gemischen. Rapport bericht, 20/71 Saint — Louis, 1—71
37. Г. Г. Черный, С. Ю. Чернявский. Докл. АН СССР, 73, 212.
38. Г. Г. Черный. Течение газа с большой сверхзвуковой скоростью. М., Физматгиз 1959.
39. J. H. Lee, R. Knystautas, G. G. Bach. Theory of explosions. McGill University Report 69—10, 1969.
40. С. М. Гишинский, Г. Г. Черный. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, 1.
41. М. П. Самозванцев. ПМТФ, 1964, 4.
42. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
43. R. A. Strehlow. Astronautica Acta, 1969, 14.

УДК 622.215.2

ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛН СЖАТИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов
(Новосибирск)

Существующие схемы низкотемпературного сжатия водорода [1, 2] требуют разработки методов измерения термодинамического состояния вещества в процессе сжатия. В [1, 2] применялась рентгеновская диагностика для измерения размеров контейнера, заключающего водород. В [2] использовалась аргоновая подсветка для регистрации интенсивности отраженного и проходящего через сжатый водород света. Эта оптическая диагностика не работала из-за разрушения сапфировых стекол, между которыми был заключен водород, при давлении около 100 кбар.

В настоящей работе ставилась задача отработки метода теневой съемки ударно-волновых процессов в жидком водороде. Этот метод был применен для измерения скоростей ударной волны в водороде, боковой волны разрежения и волны разрежения, отходящей от свободной поверхности.

Затухающая ударная волна

На рис. 1 изображена схема опыта, в котором проводилась теневая съемка движения сильно затухающей ударной волны (УВ). Волна создавалась зарядом из литого ТГ 50/50 ($\rho = 1,68 \text{ г/см}^3$), погруженным в жидкий водород. Фронт ударной волны распространялся в направлении оси OZ , вдоль которой для измерения скорости ударной волны D расположена жесткая координатная сетка из дюралюмина толщиной 1 мм. Аргоновый источник подсветки имел фокусное пятно $\approx \varnothing 10 \text{ мм}$ и был отнесен на 1,5 м от криостата. Направление подсветки и оптической оси фоторегистратора — OX . Объектив фоторегистратора строил изображение координатной сетки

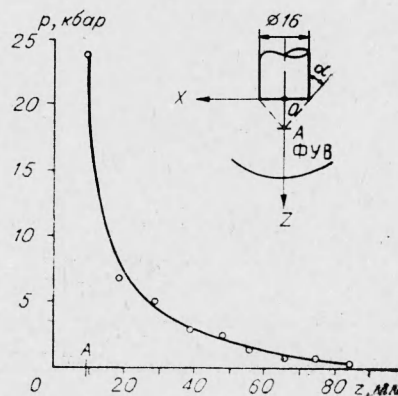


Рис. 1.

на пленке. Конструкция криостата с окном для оптических исследований и конструкция аргонового источника подсветки описаны в [3]. Данная схема эксперимента аналогична использованной при съемке ударных волн в воде [4].

Зона, в которой УВ проходит не подвергаясь действию боковой волны разрежения, определяется углом боковой разгрузки α . В предположении, что фронт УВ является плоским и волна слабо затухает на участке ОА, выполняется соотношение [5]

$$\operatorname{tg} \alpha = \left[\frac{c^2}{D^2} - \frac{(D-u)^2}{D^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где D — скорость УВ; u — массовая скорость; c — скорость звука за фронтом УВ.

По фоторегистрограмме опыта (рис. 2, а) определялась скорость D . Пиковое давление на фронте УВ рассчитывалось по данным [6]. Средняя скорость на участке ОА $D_{OA} \approx 7,65$ км/с, что соответствует интенсивности УВ $p \approx 24$ кбар. На фоторегистрограмме замечен скачок в изменении D , соответствующий прохождению фронтом точки А. Это дает возможность оценить по (1) скорость звука за фронтом УВ $c = (7,5 \pm \pm 0,7)$ км/с. В точке А скорость УВ резко уменьшается до 4,7 км/с, а затем плавно — до 1,8 км/с. График падения давления после прохождения фронтом точки А представлен на рис. 1. Из фоторегистрограммы видно, что начиная с точки А за ФУВ появляется светлый след, ширина которого возрастает, а ширина темной зоны между этим следом и фронтом ударной волны уменьшается по мере затухания интенсивности УВ.

Структура засветки пленки, по-видимому, связана с кривизной фронта УВ, так как параллельный пучок света от аргонового источника дважды проходит через поверхность фронта УВ и отклоняется вследствие изменения показателя преломления ударно-сжатого водорода. По

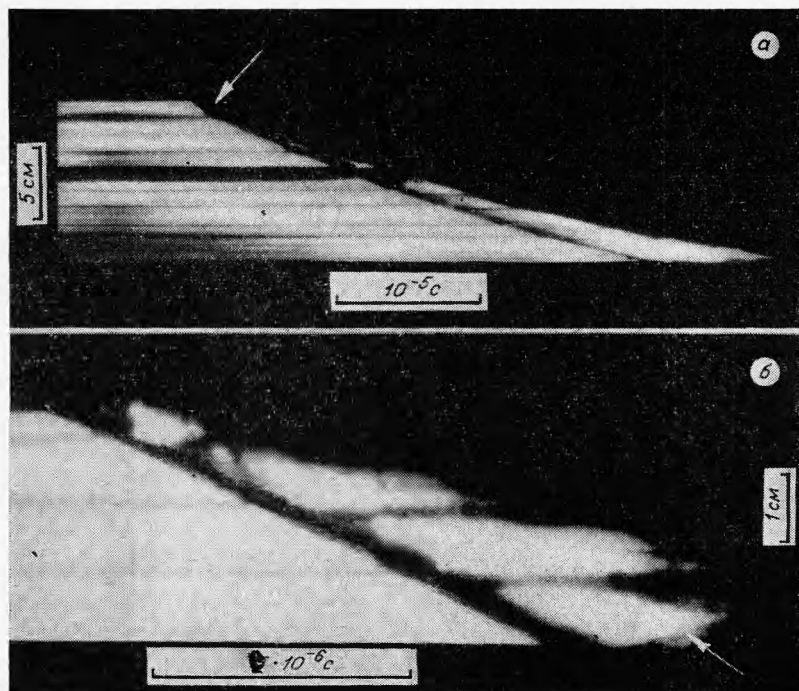


Рис. 2.

этой же причине происходит смещение изображения меток за следом фронта УВ. По мере удаления ударной волны от начальной точки давления на фронте падает и эффект отклонения уменьшается. На фоторегистрограмме это проявляется в увеличении ширины светлого следа. След вторичного почернения имеет скорость выше массовой, а следовательно, и скорости контактной поверхности продукты взрыва — водород. Поэтому полная непрозрачность оптического тракта, по-видимому, связана со вскипанием водорода в волне разрежения при критическом давлении [7] $p^* = 13$ бар, $V^* = 64$ см³/моль.

Отраженная волна разрежения

Во второй серии экспериментов теневой метод применялся для регистрации выхода УВ на свободную поверхность и возникающей централизованной волны разрежения. На рис. 3 изображена схема опыта. Ударник 1 из латуни толщиной 5 мм, летящий со скоростью w , создает в жидком водороде УВ интенсивностью 1,8 и 4 кбар. УВ движется в свинцовом стакане 2, в котором для проведения оптической съемки вырезаны щели шириной 2 мм. УВ выходит на поверхность медной мембраны 3 толщиной 20 мкм, припаянной вакуумно-плотно к стакану 4. Вакуум в стакане создается при заливке в криостат водорода вследствие вымораживания атмосферного воздуха. Оптическая ось фоторегистратора направлена вдоль OX . Поле оптической регистрации вдоль оси OZ составляет 30 мм.

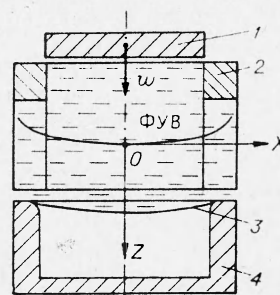


Рис. 3.

На рис. 2, б представлена фоторегистрограмма опыта при $D \approx 3,8$ км/с, $p \approx 4$ кбар. После прохождения УВ оптический тракт частично теряет прозрачность. Смещение следа от меток за фронтом УВ вызвано его кривизной в щели стакана. Вслед за фронтом со скоростью 2,2 км/с движется зона полной потери прозрачности, которая оставляет на пленке размытый след и не связана со скоростью ударника ($w \approx 1,5$ км/с). По-видимому, как и в предыдущем опыте, непрозрачность оптического тракта обусловлена боковой разгрузкой через щель в стакане. В нижней части фоторегистрограммы виден отходящий от мембраны со скоростью 2,6 км/с след потемнения (указан стрелкой). На негативе просматривается структура этого следа: сначала водород светлеет, а затем движется область потери прозрачности. Однако сложная оптическая схема опыта (луч света неоднократно проходит через среду с разным коэффициентом преломления) не дает возможности привести в соответствие газодинамическую картину течения и структуру засветки пленки. Если этот след отождествить с характеристикой, разделяющей область установившегося течения за фронтом УВ от области волны разрежения, а для расчета массовой скорости воспользоваться данными

[6], можно определить скорость звука за фронтом УВ.

В таблице приведены результаты измерения c и рассчитанные по данным [6] параметры ударных волн (опыты 2, 3). Здесь же приведены результаты определения

Номер опыта	D , км/с	w , км/с	p , кбар	c , км/с	$\left(\frac{dp}{dV}\right)_s^*$ кбар·г/см ³
1	7,65	4,35	24±28*	7,5±0,7	15,5±3,8
2	3,80	1,46	4,0	4,1±0,2	2,2±0,6
3	2,84	0,9	1,8	3,4±0,3	1,3±0,3

* Давление, рассчитанное по изэнтропе расширения ПВ сплава ТГ 50/50 [8].

скорости звука методом боковой разгрузки, описанным выше (опыт 1). В последнем столбце таблицы помещены значения производной $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_s$, вычисленные из равенства

$$c = V \left(- \frac{\partial p}{\partial V} \right)_s^{1/2}.$$

Сравнение результатов измерения скорости звука в ударно-сжатом водороде с приведенной в [6] ударной адиабаты жидкого водорода показано на рис. 4 (H_1 и H_2 — ударные адиабаты жидкого водорода [6] а наклоны производных $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_s$ в опытах 1, 2 и 3 обозначены отрезками

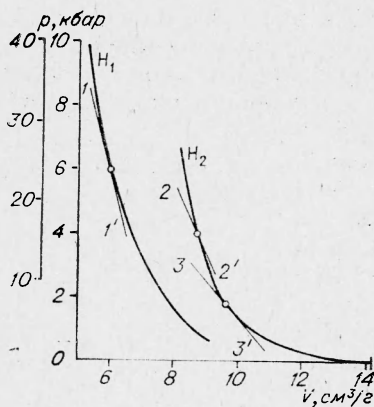


Рис. 4.

1—1', 2—2' и 3—3' соответственно). Как видно из рисунка, наклоны производных в точках, соответствующих состоянию за фронтом, в пределах экспериментальной ошибки 5—10% находятся в согласии с взаимным расположением ударной адиабаты и изэнтропы разгрузки [9].

Результаты настоящей работы показывают, что теневой метод при ударном сжатии до давлений ≥ 5 кбар ограничен измерением скорости ударной волны вследствие возникающей непрозрачности оптического тракта. В диапазоне $0,4 \div 5$ кбар теневой метод позволяет наблюдать распад произвольного разрыва за фронтом УВ. Проведение полного анализа газодинамических процессов, происходящих в этой области давлений, затруднено отсутствием данных о показателе преломления и поглощения света в ударно-сжатом водороде.

Авторы благодарят В. М. Титова, В. В. Полюдова и В. В. Сильвестрова за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
23/XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. В. Григорьев, С. В. Кормер и др. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 5.
2. R. S. Hawke, D. E. Duегге а. о. Phys. Earth Planet. Interiors, 1972, 6, 44.
3. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, ФГВ, 1975, 11, 3.
4. М. А. Cook, R. T. Keyes, W. O. Ursenbach. J. Appl. Phys., 1962, 33, 12.
5. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 4.
6. M. van Thiel, V. J. Alder. Molecular Physic, 1966, 10, 427.
7. Н. Б. Вагграфтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., «Наука», 1972.
8. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4.
9. Р. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М., ИЛ, 1950.