

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ МЕТОДОМ РЕОСТАТНЫХ ДАТЧИКОВ

*В. В. Сильвестров, Н. Н. Горшков,
В. М. Титов, В. П. Урушкин*

(Новосибирск)

Данная работа связана с методом получения высокоскоростных газовых потоков, возникающих при выходе мощной ударной волны на свободную поверхность криогенной жидкости [1, 2]. Исследование особенностей ударно-волновых процессов в жидком водороде (ЖВ) представляет в настоящее время интерес и для других задач [3, 4].

В [1] предполагалось, что при обжатии взрывом цилиндрической ампулы с ЖВ реализуется режим «квазиодномерного выдавливания», аналогично экспериментам с газами при высоком давлении [5]. Существование течения в ЖВ, опережающего фронт детонации, экспериментально доказано в [2]. При обработке данных в работе [2] предполагалось приближенное равенство массовой скорости u_p за фронтом ударной волны (УВ) в водороде скорости детонации D , т. е. схлапывающаяся оболочка играла роль «детонационного поршня». Эта идеализированная модель хорошо описывает результаты по скоростям изэнтропического течения при разгрузке.

Ниже изложены результаты по уточнению этой модели, для чего исследовано изменение скорости фронта ударной волны u_s и длины столба ударно-сжатого водорода («пробки») L_s перед фронтом детонации в зависимости от параметров опыта.

Измерения выполнены с помощью реостатных датчиков, широко используемых в настоящее время для непрерывного измерения скорости [6]. В поставленных опытах к датчику предъявлялись следующие требования: возможность работы в криогенных условиях; малый размер, чтобы он не вносил заметных возмущений в исследуемый процесс; достаточно хорошее временное разрешение; относительно низкий порог чувствительности по давлениям (ввиду низкой начальной плотности жидкого водорода $0,07 \text{ г/см}^3$ при $u_p \approx D$ давление за фронтом УВ не превышает $50 \div 70$ кбар).

Этим требованиям удовлетворяет конструкция, описанная в [7], в которой основными элементами датчика являются алюминиевый капилляр, центральная неизолированная проволока с высоким удельным сопротивлением и изолирующая спираль. В датчиках, примененных в данной работе, использовались никелевый капилляр размером $0,4 \times 0,05$ мм и неизолированная константановая проволока с $\rho = 2,78 \text{ Ом/см}$. Его действие основано на непрерывном замыкании капилляра и центральной жилы скачком давления на фронте УВ. Питание датчика осуществлялось постоянным током. Напряжение, падающее на датчике и пропорциональное длине незамкнутой его части, регистрировалось осциллографом. Мгновенное значение скорости волны определяется по углу наклона касательной к осциллограмме в интересующей точке. Общая нелинейность измерительного тракта менее 6% при изменении сигнала от 50 мВ до 5 В. Абсолютная погрешность измерения длины «пробки» менее 5 мм, а точность определения u_s не хуже 10%. В контрольных опытах по измерению установившихся скоростей детонации насыпных ВВ (аммонит, тротил, гексоген) различие результатов, полученных с помощью датчика и ионизационных зондов, не превышало 3%.

Для определения нижнего предела чувствительности изготовленного датчика были поставлены эксперименты, в которых измерялась скорость затухающей УВ в водороде, известная из оптических измерений. Начальная скорость ударной волны $\approx 8,2$ км/с. При $u_s < 6,0 \div 6,4$ км/с регистрировались меньшие значения скорости, чем оптическим методом. Соответствующие величины давления за фронтом ударной волны $\approx 12 \div 15$ кбар [8], что сопоставимо с пределом прочности материала капилляра. Поскольку в работе измерения проводились при более высоких давлениях, то изготовленный датчик оказалось возможным применять во всем исследуемом диапазоне давлений.

Постановка экспериментов. На рис. 1 представлена схема опыта по определению характеристик течения при обжати взрывом цилиндрической ампулы с ЖВ. Заряд взрывчатого вещества 2 обжимает металлическую ампулу 3, заполненную жидким водородом 4. На оси ампулы расположен реостатный датчик 5, с помощью которого определяется траектория ударной волны $X_s(t)$. Вдоль заряда расположены ионизационные зонды 1, позволяющие определять траекторию детонационной волны $X_D(t)$. Первый зонд совмещен с началом датчика для синхронизации обеих траекторий.

После обработки осциллограмм сигналов с датчика и ионизационных зондов строится $x-t$ -диаграмма (рис. 2) каждого опыта, по которой определяются изменение скорости $u_s(x)$, длины пробки $L_s(x)$ и среднее (по длине заряда) значение D (x — координата вдоль оси ампулы). Существование начального участка x_0 , на котором детонация опережает фронт УВ, объясняется процессом формирования течения.

Заметим, что D меняется от опыта к опыту в пределах 5%, со средним значением $D_0 = 8,1$ км/с. Как показывает эксперимент, непостоянство D не приводит (в пределах ошибки измерения) к изменению X_s . В то же время X_D меняется заметно, что приводит к существенному влиянию D на величину «пробки», определяемую как $L_s = X_s - X_D$. Для сравнения результатов отдельных экспериментов рассчитывалась приведенная длина «пробки» $L_s^* = L_s + (D - D_0) \left(\frac{X_D - X_0}{D} \right)$, (см. рис. 2). Это позволило учесть влияние D на длину «пробки» и сравнивать значения L_s для разных опытов.

Результаты экспериментов. На рис. 3 приведены зависимости u_s и L_s^* от координаты вдоль оси ампулы для разных толщин слоя взрывчатого вещества Δ . Стрелками отмечены моменты опережения детонационного фронта ударной волной. Размеры ампулы оставались неиз-

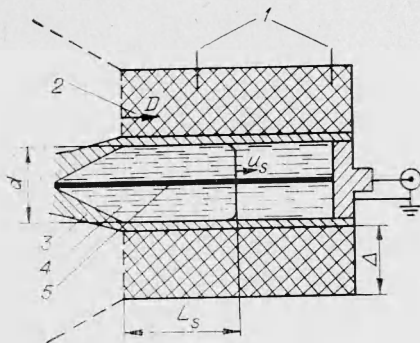


Рис. 1. Схема постановки экспериментов. Во всех опытах длина зарядов и ампулы 30 см, ВВ — литой ТГ 50/50; экспериментальная сборка находится при температуре кипения жидкого водорода 20,5 К.

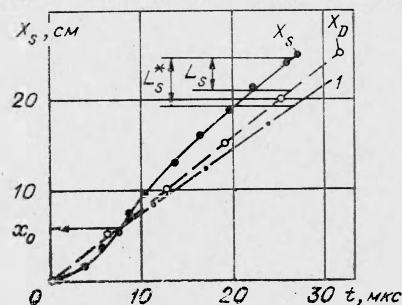


Рис. 2. Типичная $x-t$ -диаграмма опыта: материал ампулы — латунь, $d = 1,0$ см, $\Delta = 2,0$ см. — — — траектория детонационной волны, соответствующая средней скорости детонации D_0 .

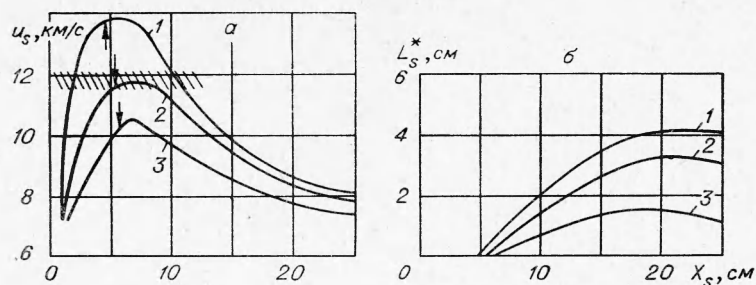


Рис. 3. Изменение скорости ударной волны (а) и приведенной длины «пробки» (б) в зависимости от координаты фронта ударной волны. Штриховкой отмечена область значений u_s , рассчитанных при выполнении режима «квазиодномерного выдавливания» для $u_p \approx D = 7,7 \div 8,1$ км/с.

1 — $\Delta = 2,4$ см; 2 — $\Delta = 1,6$ см; 3 — $\Delta = 0,8$ см.

менными (материал — латунь; $d = 1$ см; толщина стенки 0,1 см). По мере развития процесса скорость возмущения растет, практически достигая максимума в тот момент, когда возмущение обгоняет фронт детонации. Затем скорость падает (рис. 3, а) до значений D_0 при $X_s \approx 20$ см. Максимальные u_s , достигаемые при $X_s \approx X_0$, растут при увеличении Δ , этим объясняются большие L_s^* при больших Δ . Рост длины «пробки» (рис. 3, б) прекращается при $X_s \approx 20-25$ см из-за снижения скорости u_s до величины порядка скорости детонации. Подобный характер изменения $u_s(x)$ и $L_s(x)$ указывает на то, что режим «квазиодномерного выдавливания» в общем случае не выполняется, хотя в условиях опытов работы [2] ($\Delta = 1,6$ см, длина заряда 7 см) такое приближение удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

Характер изменения $u_s(x)$, $L_s(x)$ можно объяснить, предположив существование на начальной стадии схлопывания ампулы нестационарного кумулятивного процесса, определяемого толщиной слоя ВВ.

В качестве одного из вероятных механизмов такого процесса укажем на образование кумулятивного течения водорода вдоль оси ампулы ввиду возникновения пограничного слоя в конусе обжимаемой облицовки. В пользу этого свидетельствует превышение u_s (при достаточно большом Δ) над значением, определенным по экстраполированной ударной адиабате [8] для $u_p \approx D$ (см. рис. 3, а). Снижение скорости УВ и ограничение длины «пробки» объясняется, по-видимому, развитием пограничного слоя на стенке цилиндрической части ампулы и возможной утечкой вещества из ударносжатой области за фронтом УВ. Ввиду сложности течения вопрос о соответствии фронта УВ (см. рис. 1) плоскому остается открытым, хотя при достаточной длине ампулы (15 диаметров) в работе [2] показана правомерность такого приближения. В пределах точности эксперимента зависимость максимума приведенной длины «пробки» $\max L_s^*$, который достигается в эксперименте, от толщины слоя ВВ описывается линейной функцией $\max L_s^* = (1,83 \pm 0,31) \cdot \Delta$. Однако изменение $\max L_s^*$ от μ , где μ — отношение массы ВВ к массе ампулы, носит логарифмический характер $\max L_s^* = (3,45 \pm 0,19) \cdot \lg \mu$, ($15 > \mu > 2,5$). Это указывает на достижение при $\Delta = 2,4$ см почти максимальных значений длины «пробки», т. е. при дальнейшем увеличении Δ следует ожидать лишь незначительного возрастания $\max L_s^*$.

Изменение внутреннего диаметра ампулы в интервале $1,0 \div 3,2$ см проводилось в экспериментах с ампулами из дуралюмина длиной 30 см при постоянном $\mu = 14$. В опытах зафиксировано снижение максимальных значений u_s до 10,5 км/с и ослабление затухания u_s по длине ампулы (примерно вдвое) при увеличении размера, что указывает на

уменьшение влияния пограничных слоев. При данной длине заряда значений $\max L_s^*$ более 4 см достигнуто не было.

Во всех поставленных опытах была зарегистрирована скорость детонации ТГ 50/50 $D = (8,13 \pm 0,25)$ км/с (среднее 15 измерений), что на 6,3% превышает значение D при $T = 290$ К [9]. Наиболее вероятными причинами этого расхождения можно было бы считать возрастание скорости детонации из-за увеличения плотности ввиду сокращения размеров при $T = 20,5$ К (для объяснения эффекта необходимо сокращение линейных размеров на $1,7 \div 2,1\%$) или изменение теплового эффекта реакции ввиду понижения начальной температуры. Были поставлены специальные опыты по определению сокращения размеров используемого ВВ при понижении температуры до 20,5 К. Зарегистрированное изменение менее $0,8 \pm 0,2\%$ соответствует возрастанию скорости детонации менее чем на 2%. Кроме того, с помощью ионизационных зондов была измерена скорость детонации сплошного цилиндрического образца ТГ 50/50 диаметром 3,0 см, находящегося в жидком водороде. Полученное значение $(7,71 \pm 0,11)$ км/с хорошо согласуется с независимо определенным с помощью оптического метода значением $(7,70 \pm 0,09)$ км/с.

Эксперименты показывают, что высказанные предположения не объясняют изменение скорости детонации заряда ВВ с полостью, заполненной жидким водородом. Очевидно, эффект связан с существованием области высокого давления («пробки») перед фронтом детонации, что может привести к изменению режима детонации в прилегающем слое ВВ. Аналогичные явления могут иметь место и при взрыве зарядом ВВ с полостью без заполнителя [10, 11].

Таким образом, режим «квазиоднородного выдавливания» при взрывном обжатии ампул с жидким водородом есть ограниченное приближение реального процесса и в общем случае не реализуется. Имеет место сложное неоднородное нестационарное течение, на развитие которого существенное влияние оказывают возникающие пограничные слои. При этом следует ожидать изменения давления во фронте волны от 90 кбар, что соответствует значению $u_s \approx 13,7$ км/с (см. рис. 3, а), до ~ 30 кбар при $u_s \approx D$. При дальнейшем увеличении длины ампул возможно появление второго периода возрастания u_s , подобно зарядам без заполнителя [10, 11].

Авторы признательны С. А. Бордзиловскому, С. М. Караханову за сообщение данных по затуханию ударной волны в жидком водороде и скорости детонации ТГ 50/50 при $T = 20,5$ К.

Поступила в редакцию
19/IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Титов. В сб. Динамика сплошной среды. Вып. VII. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1971, с. 13.
2. V. M. Titov, V. V. Sil'vestrov. In book: Recent Developments in Shock Tube Research. Proc. IX-th Int. Shock Tube Symp., Stanford, 1973, p. 526.
3. M. van Thiel, M. Ross et al. Phys. Rev. Lett., 1973, 31, 16.
4. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. М. Титов. ФГВ, 1974, 10, 2.
5. S. P. Gill, W. V. Simpkinson. Proc. VII-th Int. Shock Tube Symp., Toronto, 1969, p. 366.
6. Proc. IV-th Symp. (Int.) on Detonation, U. S. Govt. Print. Off., Washington, 1965, p. 412. Proc. V-th Symp. (Int.) on Detonation, Off. Naval Research Department of the Navy, Arlington, Virginia, 1970, pp. 47, 81, 231.
7. Рибович, Уотсон, Гибсон. РТК, 1968, 6, 7.
8. M. van Thiel, B. J. Alder. Molec. Phys., 1966, 10, 427.
9. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
10. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.
11. А. С. Загуменнов, Н. С. Титова и др. ПМТФ, 1969, 2.