

## ВОЛНА ДЕТОНАЦИИ В СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЬ — ПУЗЫРЬКИ ГАЗА

А. И. Сычев  
(Новосибирск)

В [1] показано, что процесс распространения ударной волны (УВ) в системах жидкость — пузырьки газа, содержащих химически реагирующие компоненты, сопровождается воспламенением среды за ударным фронтом (исследованы два типа газожидкостных систем с равномерно распределенными в жидкости пузырьками газа: химически не реагирующая жидкость — пузырьки взрывчатой газовой смеси и жидкость (горючее) — пузырьки газа (окислитель)). В [2] для характеристики процесса воспламенения цепочки пузырьков взрывчатой газовой смеси в жидкости ударной волной использован термин «пузырьковая детонация», хотя наблюдаемый процесс не являлся самоподдерживающимся — по мере распространения скорость и давление ударной волны уменьшались. В настоящей работе ставится задача выяснить возможность и условия существования волны детонации в газожидкостной системе с равномерно распределенными в жидкости пузырьками газа.

Экспериментальные исследования выполнены на установке, описанной в [1] и модифицированной в настоящей работе (рис. 1). По длине вертикально расположенной гидродинамической ударной трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 35 мм, состоящей из секций высокого 1 и низкого 3 давлений с разрывной диафрагмой 2 между ними, располагались две оптические секции из нержавеющей стали с окнами из оргстекла размером  $8 \times 240$  мм. Секцию 3 заполняли жидкостью, пузырьки в которой создавались при прохождении газа через систему 12 капиллярных отверстий. Заподлицо с внутренней поверхностью окон секций устанавливали пьезоэлектрические датчики давления 4 и 7, запускающие осциллографы ОК-33 М и ОК-33 и регистраторы параметров волновых возмущений 5, 6, 8—10, сигналы с которых подавали на осциллографы через истоковый повторитель с входным сопротивлением  $\sim 10^9$  Ом. Постоянная времени каждого датчика с параллельной емкостью  $\sim 1$  с. Характеристики пьезодатчиков и способ их крепления описаны в [3]. Для регистрации свечения, сопровождающего процесс воспламенения газожидкостной системы, использовали фотоэлектронный умножитель ФЭУ-31, оптический ввод которого 11 располагали диаметрально противоположно датчику давления 9. Оптическую съемку процесса вели барабанным фоторегистратором.

Исследования выполнены на примере газожидкостной системы типа химически не реагирующая жидкость — пузырьки взрывчатой газовой смеси:  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$ . Для сравнения проведено изучение процесса распространения УВ в системе, не содержащей химически реагирующих компонентов ( $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$ ).

Объемную концентрацию газовой фазы  $\beta_0$  в газожидкостной среде определяли по подъему столба жидкости высотой  $h$  на величину  $\Delta h$  при прохождении через жидкость пузырьков газа, так что  $\beta_0 = \Delta h(h + \Delta h)^{-1}$ . Опыты проведены при  $\beta_0 = 1, 2, 4, 6, 8$  и  $10\%$ , при этом  $\Delta\beta_0/\beta_0 = +0,10 \div -0,25$ , где  $\Delta\beta_0$  — ошибка в определении  $\beta_0$ . Диаметр пузырьков смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$  и  $\text{N}_2 - d_0 = 3,5 \div 4,0$  мм. Давление на поверхности жидкости с пузырьками газа поддерживали равным 1 атм. УВ в газожидкостной системе генерировали сжиганием

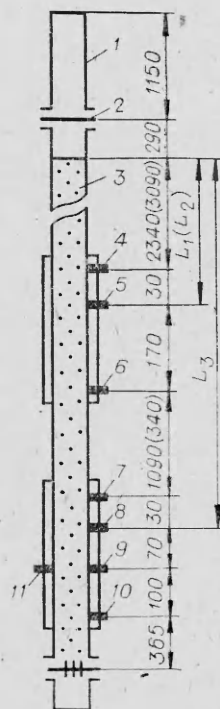


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

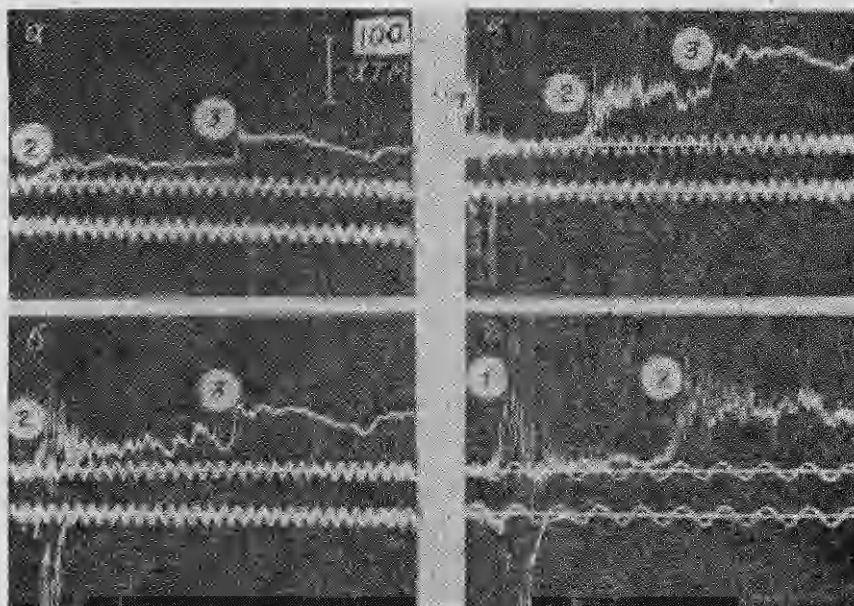


Рис. 2. Осциллограммы профилей давления волновых возмущений (верхний луч) и свечения газожидкостной среды (нижний луч);  $p_{0в} = 2,0$  (а),  $2,5$  (б),  $3,5$  (в) и  $4,0$  атм (г),  $\rho_0 = 2\%$ , период синусоиды  $T = 100$  мкс.  
1 — уединенная волна; 2 — падающая УВ; 3 — отраженная УВ.

смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  в секции высокого давления. Интенсивность УВ варьировали изменением начального давления  $p_{0в}$  смеси.

Типичные осциллограммы, характеризующие распространение УВ в системе  $H_2O - (C_2H_2 + 2,5O_2)$ , представлены на рис. 2. Верхний луч на осциллограммах рис. 2 — сигнал датчика давления 9, нижний — сигнал ФЭУ-31 (17) (см. рис. 1). В [1] показано, что воспламенение газожидкостных систем, содержащих химически реагирующие вещества, имеет место в ударных волнах, интенсивность которых выше критической  $p_1^*$ . Величина  $p_1^*$  зависит от параметров системы, в частности, от концентрации газовой фазы  $\beta_0$ . В [1] установлено, что в смеси  $H_2O - (C_2H_2 + 2,5O_2)$  при  $\beta_0 = 6 \div 8\%$   $p_1^* = 40 \div 50$  атм (по окончании пульсаций давления за фронтом волны). На рис. 2, б представлена осциллограмма, иллюстрирующая распространение УВ критической интенсивности в системе  $H_2O - (C_2H_2 + 2,5O_2)$  при  $\beta_0 = 2\%$ . В этом случае  $p_1^* = 20 \div 30$  атм. Профиль давления ударной волны имеет особенности, аналогичные отмеченным в [1]: вслед за небольшим плавным ростом давления в течение  $\sim 100$  мкс (предвестником) следует ударный фронт волны (время нарастания давления во фронте  $25-50$  мкс); на фронте и за фронтом УВ регистрируются интенсивные пульсации, являющиеся следствием осцилляций пузырьков газа; через  $150-250$  мкс пульсации заканчиваются и давление выходит на почти постоянный уровень. УВ меньшей интенсивности не вызывают воспламенения газожидкостной среды (см. рис. 2, а).

При увеличении интенсивности УВ в системе формируется своеобразное волновое возмущение — от ударной волны отходит короткая уединенная волна. Регистрация свечения с помощью фотоэлектронного умножителя показывает, что воспламенение газожидкостной среды имеет место лишь в первой волне. Во второй — ударной волне — воспламенение отсутствует (рис. 2, в). Уединенная волна имеет сложный профиль давления (рис. 2, г) — на фронте и за фронтом присутствуют интенсивные пульсации давления, связанные с процессами схлопывания и воспламенения пузырьков. Регистрируемые в отдельных пульсациях пики давления до-

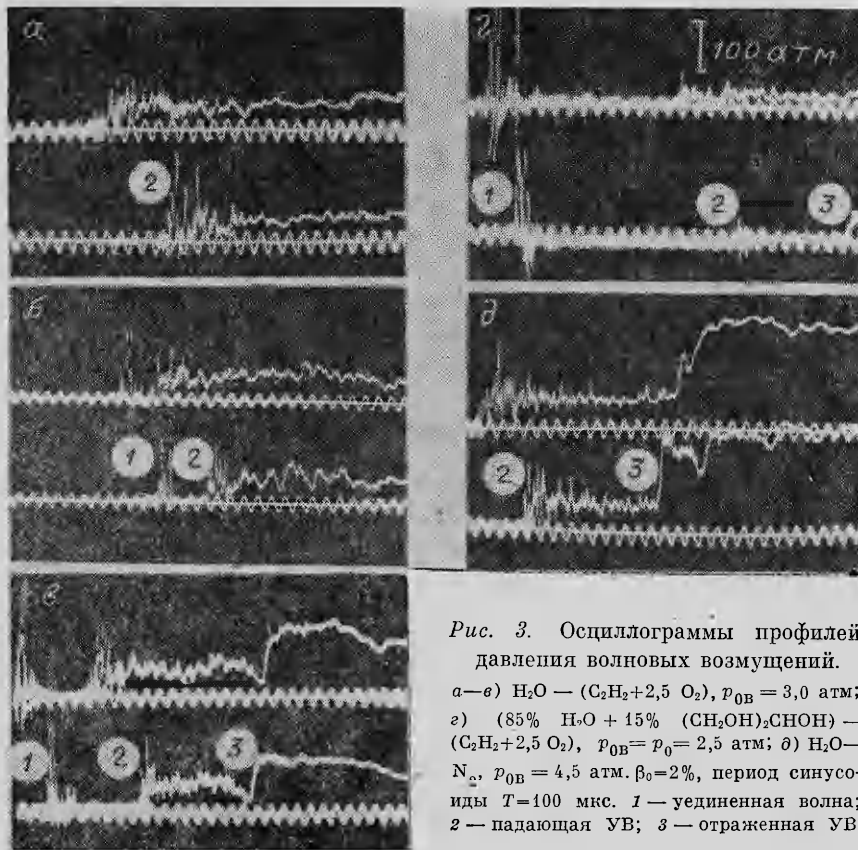


Рис. 3. Осциллограммы профилей давления волновых возмущений.

а—в)  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2)$ ,  $p_{0B} = 3,0$  атм;  
 в)  $(85\% \text{ H}_2\text{O} + 15\% (\text{CH}_2\text{OH})_2\text{СНОН}) - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2)$ ,  $p_{0B} = p_0 = 2,5$  атм; д)  $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$ ,  $p_{0B} = 4,5$  атм.  $\beta_0 = 2\%$ , период синусоиды  $T = 100$  мкс. 1 — уединенная волна; 2 — падающая УВ; 3 — отраженная УВ.

стигают 150—250 атм. Общая протяженность уединенной волны 100—200 мкс; давление за ней близко к величине давления в невозмущенной среде.

Скорость распространения волн в системе жидкость — пузырьки газа определяли в двух сериях опытов А и В с помощью четырех датчиков давления на двух участках ударной трубы одновременно. Расстояние от поверхности газожидкостной среды до датчика 5 в сериях А и В:  $L_1 = 2,37$  и  $L_2 = 3,12$  м соответственно. Расстояние до датчика 8 в обеих сериях —  $L_3 = 3,66$  м (см. рис. 1). Типичные осциллограммы, иллюстрирующие эволюцию ударной волны с интенсивностью, большей критической, в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  представлены на рис. 3. Осциллограмма рис. 3, а — сигналы датчиков 5, 6, записанные в серии опытов А; б, в — сигналы датчиков 5, 6, 8, 10 — опыты В.

Из анализа рис. 3, а следует, что УВ на расстоянии  $L_1$  распространяется со скоростью  $D = 400$  м/с. Так как интенсивность УВ выше критической, ее прохождение сопровождается воспламенением газожидкостной среды. При дальнейшем распространении УВ «с воспламенением» распадается на уединенную волну и УВ «без воспламенения» (см. рис. 3, б, в, расстояние от поверхности газожидкостной среды  $L_2$  и  $L_3$  соответственно). Скорости уединенной  $D_1$  и ударной волн «без воспламенения»  $D_2$  на рис. 3, б, в равны 560 и 425 м/с, 700 и 450 м/с соответственно. В отсутствие разрывной диафрагмы 2, разделяющей секции 1 и 3 (см. рис. 1), вид волновых возмущений аналогичен (см. рис. 3, в, сигналы датчиков 8 и 10).

На рис. 3, д приведена осциллограмма сигналов датчиков 8 и 10, иллюстрирующая распространение УВ в химически не реагирующей системе  $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$ ,  $D = 500$  м/с. Профили давления ударных волн меньшей интенсивности в этой системе имеют аналогичный вид, двухволнового процесса не наблюдается. Следовательно, существование уединенной вол-

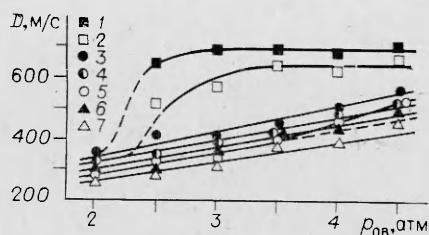


Рис. 4. Зависимость скорости уединенной (детонационной) волны  $D_1$  (1, 2), ударных волн  $D_2$  (3, 4) и  $D$  (5-7) в системах  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2)$  (1-5) и  $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$  (6, 7) от  $p_{0v}$ . 1, 3, 6 -  $L_3$ ; 2, 4 -  $L_2$ ; 5, 7 -  $L_1$ ;  $\beta_0 = 2\%$ .

ны обусловлено энерговыделением в химически активной газожидкостной среде. При отражении волнового возмущения от твердой поверхности энерговыделение в среде отсутствует (см. рис. 2, в), поэтому уединенная волна при отражении «расплывается» (см. рис. 3, в).

Результаты измерений скорости распространяющихся в газожидкостных системах волновых возмущений на различных участках ударной трубы приведены на рис. 4. Скорости уединенных и ударных волн представлены в виде зависимостей от начального давления  $p_{0v}$  взрывчатой смеси в секции высокого давления, которое при заданной объемной концентрации газа в жидкости является мерой интенсивности генерируемой УВ. Каждая точка на графике получена при усреднении данных 5-10 опытов. Из представленных на рис. 4 результатов следует, что распространение в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  УВ с интенсивностью выше критической является нестационарным: на некотором расстоянии от поверхности газожидкостной смеси от ударной волны «с воспламенением» отделяется уединенная волна, которая, ускоряясь, распространяется далее со скоростью, большей скорости следующей за ней УВ. В опыте, зафиксированном на рис. 3, в, уединенная волна опережает ударную на 25-30 см. Повышение начальной интенсивности УВ ведет к ускорению эволюции процесса формирования уединенной волны, т. е. расстояние, которое проходит УВ до отделения от нее уединенной, уменьшается с ростом интенсивности УВ (см. рис. 4).

УВ в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  распространяется почти с постоянной скоростью (как на участке формирования уединенной волны, так и после ее отделения). Незначительное увеличение скорости УВ связано с изменением параметров газожидкостной среды вследствие роста гидростатического давления (в соответствии с уравнением состояния [4]  $\frac{\beta_0 p_0}{1 - \beta_0} = \text{const}$ , где  $p_0$  — давление в невозмущенной среде) и находится в согласии с расчетом по формуле [4]  $D^2 = p/p_0 \cdot c_0^2$ , где  $c_0^2 = p_0/\beta_0 \rho_0$  — скорость звука в невозмущенной среде;  $\rho_0$  — плотность среды;  $D$  и  $p$  — скорость и давление УВ.

Уединенная волна после отделения от УВ распространяется ускоренно (см. рис. 4) и при  $\beta_0 = 2\%$  и  $p_{0v} = 3,5$  атм достигает скорости 650 и 690 м/с на расстоянии  $L_2$  и  $L_3$  соответственно,  $c_0 \approx 80$  м/с, т. е. волна распространяется со сверхзвуковой скоростью. С увеличением интенсивности инициирующей УВ ( $p_{0v}$ ) значения скоростей уединенной волны на данных расстояниях от поверхности среды остаются постоянными. Различия в величинах скоростей так же, как и для ударных волн, связано с изменением параметров среды вследствие роста гидростатического давления в столбе жидкости с пузырьками газа с увеличением расстояния от поверхности. Независимость скорости уединенной волны на данном расстоянии от интенсивности инициирующей ударной волны говорит о том, что процесс распространения уединенной волны является самоподдерживаемым. Таким образом, так как вследствие диссипации энергии УВ затухает, при достаточном расстоянии пробега в газожидкостной системе будет распространяться лишь уединенная волна.

Совокупность представленных экспериментальных данных свидетельствует о существовании в системе жидкость — пузырьки газа самоподдерживающегося процесса: уединенной волны, распространение которой

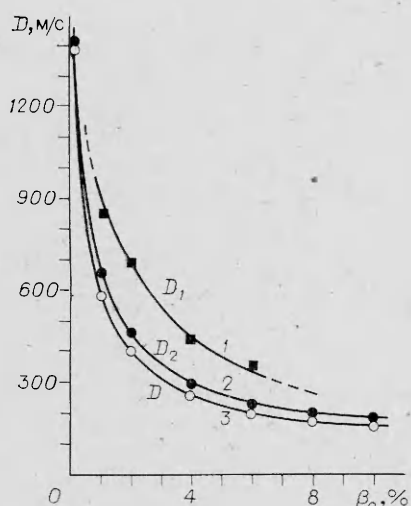


Рис. 5. Зависимость скорости детонационной волны  $D_1$ , ударных волн  $D_2$  и  $D$  в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2)$  от  $\beta_0$ .  
1, 2 —  $L_3$ ; 3 —  $L_1$ ;  $p_{0в} = 3,5$  атм.

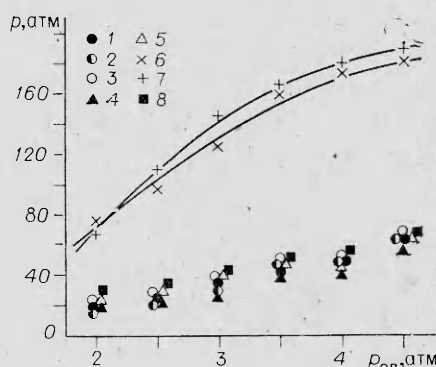


Рис. 6. Зависимость давления за фронтом падающей (1-5) и отраженной (6, 7) ударных волн в системах  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  (1-3, 6) и  $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$  (4, 5, 7) от  $p_{0в}$ .

1, 4, 6, 7 —  $L_3$ ; 2 —  $L_2$ ; 3, 5 —  $L_1$ ;  $\beta_0 = 2\%$ ; 8 — расчетные значения давления, развивающегося над поверхностью газожидкостной среды при сгорании газа в замкнутом объеме (по данным [10]).

со сверхзвуковой скоростью сопровождается энерговыделением в среде. Назовем данный процесс волной детонации в системе жидкость — пузырьки газа.

Режим распространения детонационной волны (ДВ) носит квазистационарный характер (см. рис. 4). Выход ДВ на квазистационарный режим ускоряется с увеличением интенсивности инициирующей УВ. В отличие от волны детонации с ростом интенсивности скорость УВ возрастает (см. рис. 4) и может оказаться больше скорости ДВ. В этом случае можно говорить о режиме перешагнутой детонации.

Анализ фоторегистрограмм разверток самосвечения ДВ, распространяющейся в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$ , показывает, что характерные особенности процесса воспламенения пузырьков в ней аналогичны отмеченным в [1] особенностям воспламенения газожидкостной среды ударной волной: сжатие пузырька в волне ведет к его воспламенению, при этом наблюдается образование и свечение более мелких вторичных пузырьков. Длина зоны, в которой регистрируется свечение пузырьков, составляет  $\sim 7$  см. В [1] на рис. 4, а зафиксирована начальная стадия формирования ДВ в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  при  $\beta_0 = 6\%$ .

На рис. 5 представлены результаты измерений скорости ударных и детонационных волн, распространяющихся в системе  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  при различных значениях  $\beta_0$ . Измерения проведены в серии опытов А. УВ в газожидкостной среде создавались при  $p_{0в} = 3,5$  атм. ДВ существует при  $0 < \beta_0 \leq 8$ : если  $\beta_0 \rightarrow 0$ , скорость ударной и детонационной волн приближается к скорости звука в жидкости ( $c_{ж} \approx 1500$  м/с). Данная интенсивность УВ при  $\beta_0 \approx 8\%$  является критической: если  $\beta_0 > 8\%$ , воспламенение системы  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$  ударной волной, созданной при  $p_{0в} = 3,5$  атм, отсутствует.

Результаты измерения давлений за фронтом падающей (по окончании пульсаций давления) и отраженной УВ по длине ударной трубы приведены на рис. 6 в виде зависимостей от давления взрывчатой смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$  в секции высокого давления. Величина давления в падающих ударных волнах приблизительно соответствует давлению, которое развивается над поверхностью газожидкостной среды при сгорании газа в замкнутом объеме (см. рис. 6, 8).

Из анализа рис. 4 и 6 следует, что связь между параметрами УВ в системе  $\text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$  и УВ, распространяющейся за волной детонации в смеси  $\text{H}_2\text{O} - (\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2)$ , описывается соотношением  $D^2 = \mu/\beta_0(i - \beta_0)\rho_{ж}$ , по-

лученным в [4] для химически не реагирующих систем. Здесь  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости.

Волна детонации в среде жидкость — пузырьки газа может распространяться по механизму, описанному в [5]: воспламенившиеся пузырьки излучают в окружающую жидкость ударные волны, которые, в свою очередь, воспламеняют пузырьки, находящиеся вверх по потоку. Теоретическое описание данного механизма затруднено вследствие сложного характера явления. Переход к одномерной картине имеет преимущества, даже если описанием некоторых деталей явления необходимо пренебречь.

Рассмотрим одномерную модель газожидкостной среды: прослойки жидкости толщиной  $x_1$  разделены промежутками  $x_2$ , заполненными взрывчатой смесью. Среда характеризуется параметром  $\lambda = x_1/(x_1 + x_2) \approx \rho_0/\rho_{ж}$ . Пусть в первом слое жидкости со скоростью  $D$  распространяется ударная волна. После ее выхода на свободную поверхность последняя приходит в движение. Вследствие сжатия температура газовой смеси повышается (как показано в [5], процесс сжатия можно считать адиабатическим), достигает критической величины  $T_v$ , и смесь воспламеняется (толщина газовой прослойки при этом  $x_2'$ ). По условию стационарности процесса УВ, возникающая вследствие взрыва во втором слое жидкости, должна иметь скорость  $D$ . Средняя скорость волнового возмущения  $D$  на участке  $x_1 + x_2$  удовлетворяет соотношению

$$\frac{x_1 + x_2}{D} = \frac{x_1}{D} + \frac{x_2}{v} \left(1 - \frac{x_2'}{x_2}\right)$$

или

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D} + \frac{1}{v} \lambda (1 - \sigma), \quad (1)$$

где  $\bar{v}$  — средняя скорость смещения свободной границы слоя жидкости в процессе сжатия газовой прослойки;  $\sigma = x_2'/x_2$  — степень сжатия газовой прослойки.

Данная физическая модель предложена в [6] для вычисления скорости распространения волнового возмущения в инертной пористой среде и применена в [7] при обсуждении одномерной задачи о распространении самоподдерживающегося волнового процесса в способной к химической реакции неограниченной двухфазной среде (жидкое ВВ с газонаполненными пузырьками). Анализ одномерной модели газожидкостной среды проведен в [8]. Так как  $\lambda \approx 1 - \beta_0$ , из (1) получаем

$$\frac{1}{D} = \frac{1 - \beta_0}{D} + \frac{\beta_0}{v} (1 - \sigma). \quad (2)$$

Повышение давления внутри газовой прослойки при сгорании газовой смеси можно определить по известному соотношению для «мгновенной детонации»

$$p_v = \rho_v (\gamma_v - 1) Q, \quad (3)$$

где  $\rho_v$  — плотность газовой смеси в момент воспламенения;  $\gamma_v$  — показатель адиабаты продуктов взрыва;  $Q$  — тепловой эффект реакции. При адиабатическом процессе сжатия газа с начальной температурой  $T_0$

$$\rho_v = \rho_0 (T_v/T_0)^{1/(\gamma_0 - 1)}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  и  $\gamma_0$  — начальная плотность и показатель адиабаты газовой смеси. Интенсивность ударной волны, возникающей в жидкости при взрыве газовой смеси, определяется соотношением [7]:

$$p = p_v [1 - (\gamma_v - 1) \cdot u/2c_v]^{2\gamma_v/(\gamma_v - 1)}, \quad (5)$$

где  $c_v^2 = \gamma_v \cdot p_v/\rho_v = \gamma_v (\gamma_v - 1) Q$ ;  $u$  — скорость жидкости за фронтом ударной волны. Интенсивность УВ, излучаемой воспламенившимся пузырьком

ком, по данным эксперимента составляет 150—250 атм. УВ такой интенсивности распространяются в воде со скоростью, близкой к скорости звука  $c_{ж}$ .

Положим  $T_b = 950$  К, при этом, согласно [9], период индукции воспламенения смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$   $t_1 < 1$  мкс, тогда как время схлопывания  $t_2$  газовой полости толщиной  $d_0$  составляет  $\sim 100$  мкс. Таким образом, выбор данной температуры воспламенения газовой смеси не противоречит основным положениям теории теплового взрыва. Сделанное выше предположение о «мгновенной детонации» воспламенившейся взрывчатой смеси оправданно.

Согласно [8], скорость смещения границы слоя жидкости  $v'$  в процессе сжатия газовой прослойки определяется соотношением

$$v'/v_0 = 1 - p_0/2p(\sigma^{-\gamma_0} - 1), \quad (6)$$

где

$$v_0 = 2p/\rho_{ж}c_{ж} = 2u \quad (7)$$

— начальная скорость границы слоя жидкости;  $p_0$  — начальное давление газовой смеси. При адиабатическом сжатии

$$\sigma = (T_b/T_0)^{1/(1-\gamma_0)}. \quad (8)$$

Анализ показывает, что в момент воспламенения ( $T_b = 950$  К)  $v' = 0,6v_0$ . Среднюю скорость смещения границы слоя жидкости при сжатии положим  $\bar{v} = 0,8v_0$ . Используя (2)—(8) при  $\beta_0 = 0,02$ , находим  $\bar{D} = 630$  м/с и  $p = 190$  атм, что согласуется с наблюдаемыми в эксперименте величиной скорости волны детонации  $D_1 = 650 \div 690$  м/с и значениями пульсаций давления 150—250 атм. Оценки проведены при  $\gamma_0 = 1,326$ ,  $\gamma_b = 1,153$ ,  $Q = 2 \cdot 10^8$  Дж/кг,  $T_0 = 291$  К,  $\rho_r = 1,238 \cdot 1,35$  кг/м<sup>3</sup> (с учетом гидростатического давления на расстоянии 3,5 м от поверхности газожидкостной смеси). Начальные параметры и параметры продуктов детонации смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  взяты из [10]. Отметим, что, согласно [8], максимальная температура  $T_{max}$ , которая может быть достигнута при адиабатическом сжатии газовой прослойки ударной волной  $p$ , удовлетворяет соотношению

$$p/p_0 - (T_{max}/T_0)^{\gamma_0/(\gamma_0-1)} = 0.$$

При  $p = 190$  атм  $T_{max} = 1060$  К. Таким образом, выбор  $T_b = 950$  К является допустимым.

Рассмотрим другие возможные механизмы инициирования газожидкостной среды. Известно [11, 12], что при взаимодействии пузырька с ударной волной на конечных стадиях процесса сжатия образуется кумулятивная струя жидкости, скорость которой по данным [13, 14] может достигать величины  $D$  скорости УВ. Полагая, что кинетическая энергия жидкости полностью переходит в тепловую при скорости струи  $\sim 1500$  м/с, находим, что нагрев воды в месте удара составляет  $\sim 270$  К, т. е. воспламенение пузырька маловероятно. Однако нагрев газа вследствие образования головной ударной волны при распространении струи достигает  $\sim 1650$  К, что вполне достаточно для воспламенения взрывчатой смеси. Таким образом, если пузырек при сжатии не воспламенился до формирования кумулятивной струи, возможно последующее воспламенение взрывчатой смеси в пузырьке при распространении струи жидкости.

В [5] проанализирован механизм инициирования взрыва парогазовых пузырьков, согласно которому продукты взрыва, возникшего в одном пузырьке, внедряются в другой пузырек, пробив разделявшую их жидкую прослойку. В условиях настоящего эксперимента такой механизм, по-видимому, не реализуется, так как анализ фоторегистрограмм процесса воспламенения пузырьков в детонационной волне, снятого на неподвижную фотопленку, показывает, что размер области горячих (светящихся) продуктов взрыва газовой смеси в пузырьках не превышает  $0,6d_0$ ,

в то время, как среднее расстояние между пузырьками  $l = d_0(\pi\sqrt{2}/6\beta_0)^{1/3}$  в данном случае равно  $2, 3d_0$ .

Проведенное экспериментальное исследование процесса воспламенения системы жидкость  $H_2O$  — пузырьки взрывчатой газовой смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  ударной волной показало, что в газожидкостной среде возможно существование сверхзвукового самоподдерживающегося процесса — волны детонации. Режим распространения ДВ носит квазистационарный характер.

В заключение автор благодарит А. В. Пинаева за обсуждение постановки задачи, критические замечания и за предоставленную возможность использовать созданную им аппаратуру и пьезодатчики, В. В. Митрофанова и В. К. Кедринского за обсуждение работы.

Поступила в редакцию 13/IV 1984,  
после доработки — 18/IX 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Сычев. ФГВ, 1985, 21, 2.
2. Т. Hasegawa, Т. Fujiwara, М. Yasuhara. 9-th Intern. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Book of Abstracts. Poitiers, 1983.
3. А. В. Пинаев. ФГВ, 1983, 19, 1, 105.
4. Г. К. Бэтчелор. Механика. Сб. переводов, № 3—109. М.: Мир, 1968.
5. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
6. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation (1965), U. S. Government Printing Office, Washington, 1966, p. 258.
7. А. В. Дубовик, А. А. Гончаров, В. К. Боболев. ФГВ, 1973, 9, 4, 521.
8. В. К. Кедринский. ФГВ, 1980, 16, 5, 14.
9. G. P. Glass, G. V. Kistiakowsky e. a. J. Chem. Phys., 1965, 42, 2.
10. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчян. ФГВ, 1977, 13, 3, 393.
11. В. К. Кедринский, Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1961, 1, 27.
12. Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. Кавитация. М.: Мир, 1974.
13. F. P. Bowden, J. H. Brunton. Proc. Roy. Soc. Lond., 1961, A263, 1315.
14. R. W. Watson, F. C. Gibson. Nature, 1964, 204, 4965.

#### УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЯ

М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, А. И. Простосердов

(Москва)

подавляющая часть экспериментальных исследований ударного сжатия пористых материалов связана с определением скорости распространения возмущений  $D$  по пористому образцу при известном начальном состоянии в среде перед ним. Можно указать только единичные работы, в которых первичными данными являлись скорости свободных поверхностей пористых образцов [1, 2] или передаваемое через образец давление [3]. Во всех случаях нахождение конечных состояний, реализующихся в пористом образце, в значительной мере зависит от выбора той или иной модели рассмотрения пористого образца при ударном сжатии. Чтобы иметь информацию, пригодную для сопоставления различных моделей и проверки их справедливости, необходимо проведение экспериментов, связанных с определением параметров конечного состояния при ударном сжатии пористых образцов.

В настоящей работе измерены состояния в экранах различной динамической жесткости, расположенных перед пористыми образцами алюминия. Для этого использовали манганиновые датчики, полученные фототравлением из манганиновой фольги марки МНМЦАЖЗ-12-0,25-0,2 толщиной 0,03 мм. Чувствительный элемент датчика площадью  $4 \times 4$  мм с начальным сопротивлением  $\sim 3,5$  Ом изолировали фторпластовыми прокладками толщиной 100 мкм. При регистрации использовали электриче-