

ТРАНСФОРМАЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕД

А. И. Сычев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, sychev@hydro.nsc.ru

Экспериментально исследован процесс перехода ударных волн из пузырьковой среды в жидкость или в пузырьковую среду с другими свойствами. Получены данные о структуре, скорости распространения и давлении падающей на границу раздела сред ударной волны, прошедшей и отраженной волн. Проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета.

Ключевые слова: пузырьковая среда, жидкость, газ, пузырьки газа, ударная волна, прохождение, отражение, трансформация.

Экспериментальному и теоретическому исследованию ударных волн в пузырьковых средах посвящено значительное число оригинальных работ. В [1, 2] изучено распространение звуковых волн в пузырьковых средах. Структура и свойства волновых возмущений различной амплитуды и длительности в пузырьковых средах исследованы в [3–13]. В [14, 15] изучены процессы взаимодействия пузырьков газа с ударными волнами. Отражение ударных волн в пузырьковых средах от твердой стенки исследовано в [16–22]. В [23] проведено исследование перехода ударных волн через границу раздела пузырьковых сред и жидкости. Процессы трансформации ударных волн при взаимодействии с пузырьковыми завесами в жидкостях изучены в [16, 24–26]. Результаты работ, посвященных исследованию волновых процессов в пузырьковых средах, обобщены в монографиях [27–30].

Ударная волна — пример нелинейной волны. При своем распространении ударная волна оказывает воздействие на среду. В свою очередь, процессы, протекающие при этом в среде, определяют структуру и свойства самой волны. При изменении параметров среды меняются и характеристики ударной волны.

Ударные волны в пузырьковых средах, распространение которых является результатом взаимодействия жидкого и газового компонентов, трансформируются при изменении параметров пузырьковой среды.

Цель настоящей работы — изучение процесса перехода сильных ударных волн из пу-

зырьковой среды в жидкость или в пузырьковую среду с другими свойствами.

Экспериментальные исследования ударных волн в пузырьковых средах и в жидкостях проведены в вертикальной ударной трубе с внутренним диаметром 40 мм и высотой 4.3 м, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, в которой пузырьки диаметром 2.5 мм генерировались при прохождении газа через две системы капилляров, вводимых в жидкость перпендикулярно стенке ударной трубы и через ее торец. Объемную концентрацию газовой фазы пузырьковых сред изменяли в диапазоне $0.5 \leq \beta_0 \leq 6$ %. Высота столба пузырьковой среды составляла 3.55 м. Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному ($p_0 = 0.1$ МПа). Опыты проведены при температуре в помещении $T_0 = 288$ К.

Ударные волны в пузырьковой среде генерировали сжиганием ацетиленокислородной стехиометрической смеси ($C_2H_2 + 2.5O_2$) в секции высокого давления ударной трубы [31]. Амплитуду (давление) ударных волн варьировали изменением начального давления газовой смеси $C_2H_2 + 2.5O_2$. При этом давление ударных волн соответствует давлению, которое развивается над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [32].

Параметры ударных волн измеряли установленными по длине ударной трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы которых регистрировали двумя цифровыми осциллографами С9-16 (постоянная времени датчиков давления составляла 8.4 мс). Датчики

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-03-32351).

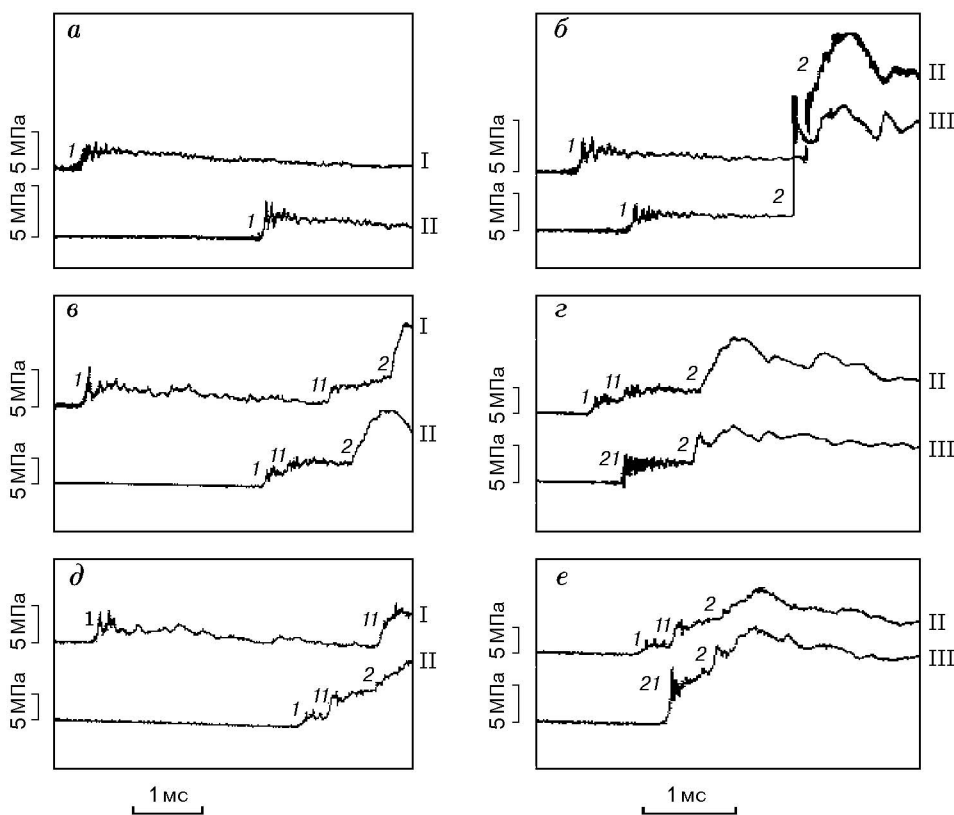


Рис. 1. Осциллограммы давления падающей (1), прошедшей через границу раздела сред (21), отраженной от границы раздела сред (11) и отраженной от торца ударной трубы (2) ударных волн:

$\alpha = 0.25$, газ — N_2 ; а, б — $\beta_0 = 4\%$; в, г — $\beta_1 = 4\%$ и $\beta_2 = 1\%$; д, е — $\beta_1 = 4\%$ и $\beta_2 = 0$; расстояние от границы раздела сред до датчиков, м: I — (-0.665) , II — (-0.070) , III — 0.060

тарировали ударными и детонационными волнами в газах.

Изучены следующие системы: «пузырьковая среда», «пузырьковая среда I — пузырьковая среда II», «пузырьковая среда — жидкость». В качестве жидкостей использованы водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0.25$ или 0.5 (вязкость растворов $1.01 \cdot 10^{-3}$, $2.27 \cdot 10^{-3}$ и 6.84×10^{-3} Па·с, скорость звука в жидкостях, определенная по скорости распространения слабых ударных волн, 1380 ± 50 , 1470 ± 50 и 1580 ± 50 м/с соответственно); пузырьки содержали аргон Ar или азот N_2 . Системы «пузырьковая среда I — пузырьковая среда II» характеризуются объемной концентрацией газовой фазы β_1 и β_2 соответственно; в системах «пузырьковая среда — жидкость» $\beta_2 = 0$; в пузырьковых средах $\beta_1 = \beta_2 = \beta_0$.

Генерируемые в пузырьковых средах

ударные волны являлись стационарными (рис. 1, а, б). Сильные ударные волны в пузырьковых средах имеют пульсационную структуру (рис. 1, а, б): на фронте и за фронтом ударной волны регистрируются интенсивные пульсации давления; через $200 \div 300$ мкс пульсации заканчиваются и давление выходит на почти постоянный уровень. Пульсации давления ударной волны в пузырьковых средах являются следствием осцилляций пузырьков газа. (В ударных волнах, распространяющихся в жидкостях, пульсации давления отсутствуют.) Стохастический характер пульсаций давления ударной волны обусловлен случайным распределением пузырьков газа в жидкости.

На рис. 1, в–е представлены осциллограммы, иллюстрирующие процесс перехода ударной волны через границу раздела «пузырьковая среда I — пузырьковая среда II» и «пузырь-

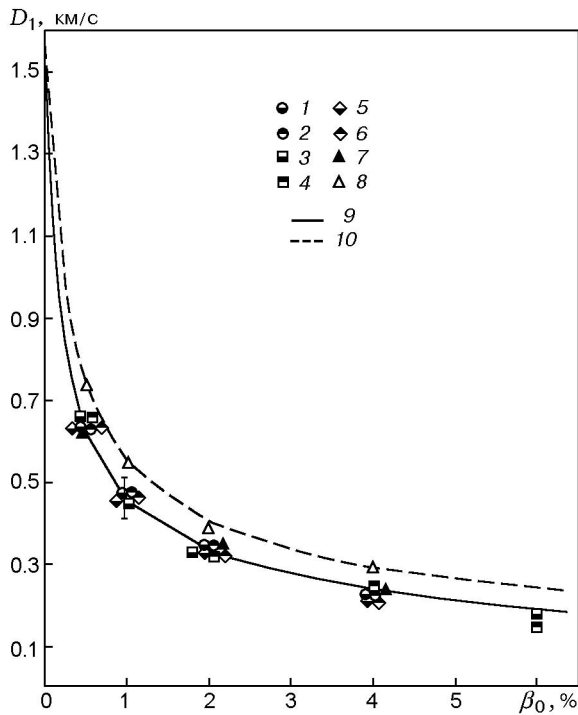


Рис. 2. Зависимости $D_1(\beta_0)$:
 $\alpha = 0$ (1, 2), 0.25 (3, 4, 9) и 0.5 (5–8, 10); газ — N_2 (1–6) и Ar (7, 8); L , м: 2.72 (1, 3, 5) и 3.25 (2, 4, 6–8); $p_1 = 2.4$ (1–7, 9) и 3.6 МПа (8, 10); 9, 10 — расчет

ковая среда — жидкость». При переходе через границу раздела сред ударная волна трансформируется: образуется прошедшая ударная волна, распространяющаяся во второй среде — в пузырьковой среде II (рис. 1, в, г) или в жидкости (рис. 1, д, е), и возникает отраженная от границы раздела сред ударная волна, распространяющаяся в пузырьковой среде I (рис. 1, в–е). При этом давление прошедшей и отраженной от границы раздела сред ударных волн возрастает с увеличением разности концентраций газовой фазы сред. Так, давление прошедшей ударной волны при переходе волны из пузырьковой среды ($\beta_1 = 4\%$) в жидкость ($\beta_2 = 0$) увеличилось примерно в три раза; при этом давление отраженной от границы раздела сред ударной волны также примерно втрое больше давления падающей ударной волны. Интенсивность пульсаций давления в прошедшей ударной волне, распространяющейся в жидкости (рис. 1, е), существенно меньше, чем в прошедшей волне, распространяющейся в пузырьковой среде (рис. 1, г).

Прошедшая ударная волна, достигая торца ударной трубы, отражается. Распространя-

ясь далее по пузырьковой среде II, отраженная от твердой преграды ударная волна проходит через границу раздела сред и переходит в пузырьковую среду I. Скорость распространения ударных волн в пузырьковых средах определяется амплитудой волны и параметрами пузырьковых сред. Ударные волны в жидкостях (как прошедшая, так и отраженная от торца ударной трубы) распространяются со скоростью звука в жидкостях.

На рис. 2 представлены результаты измерений скорости распространения ударных волн в различных пузырьковых средах (каждая точка на графике — среднее данных 3 ÷ 5 опытов). Измерения проводили с помощью датчиков давления на двух участках ударной трубы с базами 0.595 и 0.470 м (расстояние от поверхности пузырьковой среды до середины баз L равно 2.72 и 3.25 м соответственно). Скорость ударных волн на данных расстояниях от поверхности пузырьковой среды имеет практически совпадающие значения.

Скорость распространения ударных волн D_1 уменьшается с повышением концентрации газовой фазы пузырьковой среды β_0 и возрастает при увеличении амплитуды ударной волны p_1 (рис. 2). Влияние свойств газов, содержащихся в пузырьках, на характеристики ударных волн слабое: скорости распространения ударных волн в системах с пузырьками одно- и двухатомных газов имеют близкие значения. Совокупное влияние свойств жидкого компонента пузырьковых сред на скорость распространения ударных волн незначительно (см. рис. 2).

Рассмотрим взаимодействие ударной волны с границей раздела пузырьковых сред. Введем лабораторную систему отсчета, ось координат которой направлена слева направо. Пусть стационарная ударная волна (падающая волна) распространяется со скоростью D_1 в неподвижной пузырьковой среде I справа налево. Запишем уравнения сохранения массы и импульса, связывающие параметры пузырьковой среды по обе стороны ударного перехода:

$$\rho_{10} D_1 = \rho_1 (D_1 - u_1), \quad (1)$$

$$p_0 + \rho_{10} D_1^2 = p_1 + \rho_1 (D_1 - u_1)^2. \quad (2)$$

Здесь p_0 , ρ_{10} и p_1 , ρ_1 — давление и плотность пузырьковой среды перед и за фронтом ударной волны соответственно, u_1 — скорость потока среды за ударной волной. Таким образом,

ударная волна переводит пузырьковую среду I из состояния с параметрами p_0, ρ_{10}, u_0 в состояние с параметрами p_1, ρ_1, u_1 (здесь $u_0 = 0$ — скорость потока среды перед фронтом ударной волны).

Пузырьковая среда с параметрами p_1 и ρ_1 натекает со скоростью u_1 на границу раздела пузырьковых сред I и II. В результате взаимодействия потока среды с границей раздела сред образуются две волны: прошедшая через границу раздела сред ударная волна, распространяющаяся в среде II, и отраженная от границы раздела сред волна, распространяющаяся в среде I (отраженная волна является ударной в случае, когда акустический импеданс среды II больше акустического импеданса среды I, или является волной разрежения — в противном случае). Таким образом, падающая ударная волна, взаимодействуя с границей раздела пузырьковых сред, распадается на прошедшую и отраженную волны.

Имеем задачу о распаде произвольного разрыва на границе раздела пузырьковых сред. Запишем уравнения сохранения массы и импульса, связывающие параметры пузырьковой среды по обе стороны фронта прошедшей ударной волны, распространяющейся в неподвижной пузырьковой среде II со скоростью D_{21} справа налево:

$$\rho_{20}D_{21} = \rho_{21}(D_{21} - u_{21}), \quad (3)$$

$$p_0 + \rho_{20}D_{21}^2 = p_{21} + \rho_{21}(D_{21} - u_{21})^2. \quad (4)$$

Здесь p_0, ρ_{20} и p_{21}, ρ_{21} — давление и плотность пузырьковой среды перед и за фронтом прошедшей ударной волны соответственно, u_{21} — скорость потока среды за прошедшей ударной волной. Таким образом, прошедшая ударная волна переводит пузырьковую среду II из состояния с параметрами p_0, ρ_{20}, u_{20} в состояние с параметрами $p_{21}, \rho_{21}, u_{21}$ (здесь $u_{20} = 0$ — скорость потока среды перед фронтом прошедшей ударной волны).

Запишем также уравнения сохранения массы и импульса, связывающие параметры пузырьковой среды по обе стороны фронта отраженной волны, распространяющейся в сжатой падающей ударной волной пузырьковой среде I со скоростью D_{11} слева направо:

$$\rho_1(D_{11} + u_1) = \rho_{11}(D_{11} + u_{11}), \quad (5)$$

$$p_1 + \rho_1(D_{11} + u_1)^2 = p_{11} + \rho_{11}(D_{11} + u_{11})^2. \quad (6)$$

Здесь p_1, ρ_1 и p_{11}, ρ_{11} — давление и плотность пузырьковой среды перед и за фронтом отраженной волны соответственно, u_{11} — скорость потока среды за отраженной волной. Таким образом, отраженная волна переводит пузырьковую среду I из состояния с параметрами p_1, ρ_1, u_1 в состояние с параметрами $p_{11}, \rho_{11}, u_{11}$.

При распаде произвольного разрыва на контактной границе (на границе раздела пузырьковых сред) выполняются соотношения

$$u_{11} = u_{21} = u_k \equiv u, \quad (7)$$

$$p_{11} = p_{21} \equiv p. \quad (8)$$

Здесь u_k — скорость смещения контактной границы.

Для получения расчетных формул из системы уравнений (1)–(6) при условиях (7) и (8) необходимо привлечение уравнения состояния пузырьковых сред.

Пренебрегая изменением температуры жидкости в процессе ударного перехода, сжимаемость жидкого компонента пузырьковых сред учтем в акустическом приближении. Имеем

$$p_1 - p_0 = (c_1^{\text{ж}})^2(\rho_1^{\text{ж}} - \rho_{10}^{\text{ж}}),$$

где $c_1^{\text{ж}}$ — скорость звука в жидкости, содержащейся в среде I, $\rho_{10}^{\text{ж}}$ и $\rho_1^{\text{ж}}$ — плотность жидкости перед и за фронтом падающей ударной волны соответственно;

$$p - p_0 = (c_2^{\text{ж}})^2(\rho_{21}^{\text{ж}} - \rho_{20}^{\text{ж}}),$$

где $c_2^{\text{ж}}$ — скорость звука в жидкости, содержащейся в среде II, $\rho_{20}^{\text{ж}}$ и $\rho_{21}^{\text{ж}}$ — плотность жидкости перед и за фронтом прошедшей волны соответственно;

$$p - p_1 = (c_1^{\text{ж}})^2(\rho_{11}^{\text{ж}} - \rho_1^{\text{ж}}),$$

где $\rho_1^{\text{ж}}$ и $\rho_{11}^{\text{ж}}$ — плотность жидкости перед и за фронтом отраженной волны соответственно.

Сжимаемость газового компонента пузырьковых сред опишем в общем случае: полагаем, что газ совершает политропный процесс. Имеем

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{\rho_1^{\text{газ}}}{\rho_0^{\text{газ}}} \right)^n,$$

где $\rho_0^{\text{газ}}$ и $\rho_1^{\text{газ}}$ — плотность газа в пузырьках перед и за фронтом падающей ударной волны соответственно, n — показатель политропы ($1 \leq n \leq \gamma$, где γ — показатель адиабаты);

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho_{21}^{\text{газ}}}{\rho_0^{\text{газ}}} \right)^n, \quad \times \frac{1 - (p_0/p_1)^{\frac{1}{n}}}{p_1/p_0 - 1} \Big]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

где $\rho_0^{\text{газ}}$ и $\rho_{21}^{\text{газ}}$ — плотность газа в пузырьках перед и за фронтом прошедшей волны соответственно;

$$\frac{p}{p_1} = \left(\frac{\rho_{11}^{\text{газ}}}{\rho_1^{\text{газ}}} \right)^n,$$

где $\rho_1^{\text{газ}}$ и $\rho_{11}^{\text{газ}}$ — плотность газа в пузырьках перед и за фронтом отраженной волны соответственно.

Используем соотношения, связывающие плотность пузырьковой среды с параметрами жидкого и газового компонентов:

$$\frac{1}{\rho_{10}} = \frac{1 - \alpha_{10}}{\rho_{10}^{\text{ж}}} + \frac{\alpha_{10}}{\rho_0^{\text{газ}}} \approx \frac{1}{\rho_{10}^{\text{ж}}} + \frac{\alpha_{10}}{\rho_0^{\text{газ}}}$$

или

$$\rho_{10} = (1 - \beta_1)\rho_{10}^{\text{ж}} + \beta_1\rho_0^{\text{газ}} \approx (1 - \beta_1)\rho_{10}^{\text{ж}},$$

где α_{10} и β_1 — массовая и объемная концентрация газовой фазы пузырьковой среды I соответственно, $\alpha_{10} = \beta_1\rho_0^{\text{газ}}/\rho_{10}$;

$$\frac{1}{\rho_{20}} = \frac{1 - \alpha_{20}}{\rho_{20}^{\text{ж}}} + \frac{\alpha_{20}}{\rho_0^{\text{газ}}} \approx \frac{1}{\rho_{20}^{\text{ж}}} + \frac{\alpha_{20}}{\rho_0^{\text{газ}}}$$

или

$$\rho_{20} = (1 - \beta_2)\rho_{20}^{\text{ж}} + \beta_2\rho_0^{\text{газ}} \approx (1 - \beta_2)\rho_{20}^{\text{ж}},$$

где α_{20} и β_2 — массовая и объемная концентрация газовой фазы пузырьковой среды II соответственно, $\alpha_{20} = \beta_2\rho_0^{\text{газ}}/\rho_{20}$.

Для пузырьковых сред за падающей, прошедшей и отраженной волнами соотношения аналогичны.

Получаем расчетные формулы:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{p}{p_0} - \frac{p_1}{p_0} \right) \left[1 + \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (c_1^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{10}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{(p_0/p_1)^{\frac{1}{n}} - (p_0/p)^{\frac{1}{n}}}{p/p_0 - p_1/p_0} \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \frac{\rho_{10}^{\text{ж}} c_1^{\text{ж}}}{\rho_{20}^{\text{ж}} c_2^{\text{ж}}} \times \\ & \times \left[1 + \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} (c_2^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{20}^{\text{ж}}}{p_0} \frac{1 - (p_0/p)^{\frac{1}{n}}}{p/p_0 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} = \\ & = \left(\frac{p_1}{p_0} - 1 \right) \left[1 + \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (c_1^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{10}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \end{aligned}$$

— давление прошедшей и отраженной волн в зависимости от давления падающей ударной волны;

$$\begin{aligned} D_1 = & \frac{c_1^{\text{ж}}}{1 - \beta_1} \left[1 + \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (c_1^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{10}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{1 - (p_0/p_1)^{\frac{1}{n}}}{p_1/p_0 - 1} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (10) \end{aligned}$$

— скорость распространения падающей на границу раздела сред ударной волны;

$$\begin{aligned} D_{21} = & \frac{c_2^{\text{ж}}}{1 - \beta_2} \left[1 + \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} (c_2^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{20}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{1 - (p_0/p)^{\frac{1}{n}}}{p/p_0 - 1} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (11) \end{aligned}$$

— скорость распространения прошедшей через границу раздела сред ударной волны;

$$\begin{aligned} D_{11} = & c_1^{\text{ж}} \left[1 + \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (c_1^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{10}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{(p_0/p_1)^{\frac{1}{n}} - (p_0/p)^{\frac{1}{n}}}{p/p_0 - p_1/p_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12) \end{aligned}$$

— скорость распространения отраженной от границы раздела сред волны;

$$\begin{aligned} u_1 = & \frac{(p_1/p_0 - 1)}{c_1^{\text{ж}} \rho_{10}^{\text{ж}}/p_0} \left[1 + \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (c_1^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{10}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{1 - (p_0/p_1)^{\frac{1}{n}}}{p_1/p_0 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13) \end{aligned}$$

— скорость потока за фронтом падающей ударной волны;

$$\begin{aligned} u = & \frac{(p/p_0 - 1)}{c_2^{\text{ж}} \rho_{20}^{\text{ж}}/p_0} \left[1 + \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} (c_2^{\text{ж}})^2 \frac{\rho_{20}^{\text{ж}}}{p_0} \times \right. \\ & \times \left. \frac{1 - (p_0/p)^{\frac{1}{n}}}{p/p_0 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14) \end{aligned}$$

— скорость потока за прошедшей и отраженной волнами.

Анализ результатов расчета параметров падающих ударных волн для $\rho_{10}^* = \rho_{20}^* \equiv \rho_{ж}$ и $c_1^* = c_2^* \equiv c_{ж}$, проведенного для двух предельных случаев при $n = 1$ (изотермический процесс; модель «теплового равновесия пузырьков газа и жидкости») и при $n = \gamma$ (адиабатный процесс; модель «теплоизолированных пузырьков газа»), показывает, что для сильных ударных волн ($\Delta p/p_0 \gg 1$, $\Delta p = p_1 - p_0$) рассмотренные модели эквивалентны: в условиях настоящего эксперимента (см. рис. 2) относительное различие результатов расчета по обеим моделям не превышает 4 %. Для ударных волн умеренной амплитуды ($\Delta p/p_0 \approx 1$) и для слабых ударных волн ($\Delta p/p_0 \ll 1$) относительное различие результатов расчета по обеим моделям достигает 10 и 20 % соответственно и выбор расчетной модели определяется процессами тепловой релаксации пузырьков газа в ударной волне [16, 33, 28, 29].

Результаты расчета скорости распространения падающих на границу раздела сред ударных волн представлены на рис. 2 (использована модель «теплового равновесия», в рамках которой получаются более простые расчетные формулы). Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными.

Отметим, что формула (10) для расчета скорости распространения ударных волн в пузырьковых средах в предельных случаях (при $n = 1$ и при $n = \gamma$) находится в соответствии с формулами, полученными в [7, 29] и [4] соответственно.

Результаты расчета скорости распространения волн, образующихся в результате трансформации падающей ударной волны на границе раздела сред, также находятся в согласии с экспериментальными данными. Так, например, для случая, представленного на рис. 1, в (скорость падающей ударной волны $D_1 = 223$ м/с (эксперимент) и 239 м/с (расчет)), скорость отраженной от границы раздела сред волны $D_{11} = 1017$ м/с (эксперимент) и 1088 м/с (расчет), скорость прошедшей волны $D_{21} = 616$ м/с (расчет); при этом скорость движения среды за фронтом падающей ударной волны $u_1 = 9.4$ м/с, массовая скорость за фронтом прошедшей и отраженной волн (скорость движения границы раздела сред) $u = 7.3$ м/с (расчет).

На рис. 3 представлены данные измерений давления отраженной от границы раздела сред и прошедшей через границу раздела сред волн

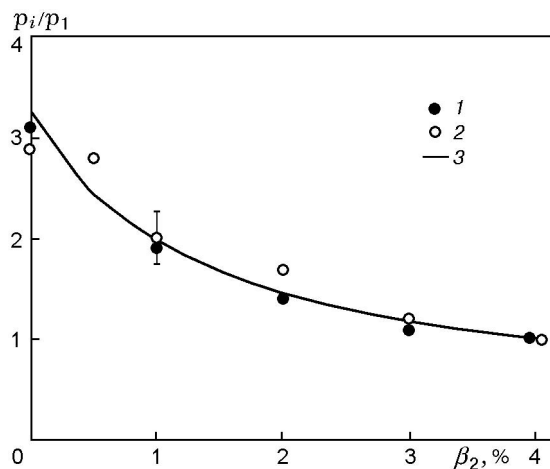


Рис. 3. Зависимости $p_i/p_1(\beta_2)$:

$\alpha = 0.25$, газ — N_2 ; $\beta_1 = 4 \%$; $p_1 = 2.4$ МПа; 1 — $p_i = p_{11}$, 2 — $p_i = p_{21}$, 3 — $p_i = p$ (расчет)

(каждая точка на графике — среднее данных $3 \div 5$ опытов). Давления отраженной и прошедшей волн близки и возрастают с увеличением разности концентраций газовой фазы сред. Расчетная зависимость удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

Заметим, что в экспериментах [23] прошедшая и отраженная ударные волны имели различные амплитуды. Несовпадение давлений волн на границе раздела сред обусловлено, по всей видимости, нестационарностью падающей ударной волны. Отметим также, что данные опытов работы [23] и настоящих экспериментов получены при различных параметрах ударных волн и пузырьковых сред, что исключает возможность сопоставления результатов. Зависимости отношения давлений прошедшей и падающей волн от отношения концентраций газовой фазы сред, полученные в [23] при решении задачи о распаде произвольного разрыва (численный расчет), и расчетная зависимость, приведенная на рис. 3, имеют качественное совпадение.

Анализ результатов расчета показывает, что при переходе ударной волны из пузырьковой среды в жидкость давления прошедшей и отраженной волн возрастают с увеличением амплитуды падающей ударной волны и при повышении концентрации газовой фазы пузырьковой среды. При переходе ударной волны из жидкости в пузырьковую среду давления прошедшей и отраженной волн возрастают с увеличением амплитуды падающей волны и уменьшаются при повышении концентрации

газовой фазы пузырьковой среды.

Скорость волны, образующейся при отражении ударной волны от границы раздела «пузырьковая среда — жидкость», и скорость прошедшей волны, образующейся при падении ударной волны на границу раздела «жидкость — пузырьковая среда», возрастают с увеличением амплитуды падающей ударной волны и уменьшаются при повышении концентрации газовой фазы пузырьковой среды.

Скорость движения среды за фронтом падающей ударной волны возрастает с увеличением амплитуды волны и при повышении концентрации газовой фазы пузырьковой среды. При падении ударной волны фиксированной амплитуды на границу раздела пузырьковых сред массовая скорость за фронтом прошедшей и отраженной волн (скорость движения границы раздела сред) зависит от соотношения между концентрациями газовой фазы пузырьковых сред и увеличивается при повышении концентрации газовой фазы как среды I, так и среды II.

В заключение заметим, что помимо случая взаимодействия ударной волны с границей раздела пузырьковых сред формулы (9)–(14) описывают также трансформацию ударной волны на границе раздела различных сред:

- при $\beta_1 = 0$ — переход ударной волны из жидкости в пузырьковую среду;
- при $\beta_2 = 0$ — переход ударной волны из пузырьковой среды в жидкость;
- при $\beta_1 = 0$ и $\beta_2 = 0$ — переход ударной волны из жидкости с параметрами ρ_{10}^* , c_1^* в жидкость с параметрами ρ_{20}^* , c_2^* ;
- при $\beta_2 = 0$ и $\rho_{20}^* \equiv \rho_m$, $c_2^* \equiv c_m$ — процесс отражения ударной волны, распространяющейся в пузырьковой среде или в жидкости (при $\beta_1 = 0$), от твердой преграды (при $\rho_{10}^* c_1^* \ll \rho_m c_m$ имеем случай отражения ударной волны от абсолютно жесткой преграды) (здесь ρ_m и c_m — плотность материала отражающей поверхности и скорость звука в твердом теле соответственно).

Изученный процесс перехода ударной волны из пузырьковой среды в жидкость или в пузырьковую среду с другими свойствами может быть использован как способ создания ударных волн с заданными характеристиками в жидкостях и пузырьковых средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mallock A. The damping of sound by frothy liquids // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1910. V. 84. P. 391–395.
2. Carstensen E. L., Foldy L. L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles // J. Acoust. Soc. Amer. 1947. N 19. P. 481–501.
3. Campbell I. J., Pitcher A. S. Shock waves in a liquid containing gas bubbles // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1958. V. 243, N 1235. P. 534–545.
4. Ляхов Г. М. Ударные волны в многокомпонентных средах // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1959. № 1. С. 46–49.
5. Иорданский С. В. Об уравнениях движения жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1960. № 6. С. 102–110.
6. Когарко Б. С. Об одной модели кавитирующей жидкости // Докл. АН СССР. 1961. Т. 137, № 6. С. 1331–1333.
7. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: Сб. переводов. М.: Мир, 1963. Т. 3, № 109. С. 65–84.
8. Van Wijngaarden L. On the equation of motion for mixtures of liquid and gas bubbles // J. Fluid Mech. 1968. V. 33. P. 465–474.
9. Нигматулин Р. И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей // Прикл. математика и механика. 1970. Т. 34, № 6. С. 1097–1112.
10. Кутателадзе С. С., Бурдуков А. П., Кузнецов В. В. и др. О структуре слабой ударной волны в газожидкостной среде // Докл. АН СССР. 1972. Т. 207, № 2. С. 313–315.
11. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко Б. С., Когарко С. М. Исследование волн сжатия в смеси жидкости с пузырьками газа // Докл. АН СССР. 1973. Т. 213, № 5. С. 1043–1046.
12. Айдагулов Р. Р., Хабеев Н. С., Шагапов В. Ш. Структура ударной волны в жидкости с пузырьками газа с учетом нестационарного межфазного теплообмена // ПМТФ. 1977. № 3. С. 67–74.
13. Гасенко В. Г., Накоряков В. Е., Шрейбер И. Р. Двухволновая модель распространения возмущений в жидкости с пузырьками газа // ПМТФ. 1979. № 6. С. 119–126.
14. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. и др. Исследование разрушения пузырьков газа в жидкости ударной волной // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220, № 4. С. 802–804.
15. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Нигматулин Р. И., Тимофеев Е. И. Влияние плотности газа на дробление пузырька ударными волнами // Докл. АН СССР. 1977. Т. 235, № 2. С. 292–294.
16. Паркин Б. Р., Гилмор Ф. Р., Броуд Г. А. Ударные волны в среде с пузырьками воздуха. Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974. С. 152–258.

17. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. и др.** Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа // Волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск, 1975.
18. **Остроумов Г. А., Дружинин Г. А., Крячко В. М., Токман А. С.** Нелинейные акустические явления в жидкости с пузырьками газа // Вестн. ЛГУ. 1975. № 16. С. 131–132.
19. **Губайдуллин А. А., Ивандаев А. И., Нигматулин Р. И.** Нестационарные волны в жидкости с пузырьками газа // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226, № 6. С. 1299–1302.
20. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Тимофеев Е. И.** Отражение плоских ударных волн от твердой стенки в системе пузырьки газа — жидкость // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 2. С. 174–178.
21. **Донцов В. Е.** Отражение волн давления умеренной интенсивности от твердой стенки в жидкости с пузырьками легкорастворимого газа // ПМТФ. 1998. № 5. С. 19–24.
22. **Донцов В. Е., Покусаев Б. Г.** Отражение ударной волны от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 2. С. 215–222.
23. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Тимофеев Е. И.** Прохождение ударных волн через границу раздела в двухфазных газожидкостных средах // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 6.
24. **Кедринский В. К.** Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–35.
25. **Кедринский В. К.** Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 14–25.
26. **Малых Н. В.** Нелинейное отражение сильных импульсов давления от пузырьков слоев // Лабораторное моделирование динамических процессов в океане. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1990. С. 46–54.
27. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.** Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1983.
28. **Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е.** Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984.
29. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
30. **Кедринский В. К.** Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
31. **Сычев А. И.** Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 130–134.
32. **Сычев А. И.** Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 103–110.
33. **Дубовик А. В., Боболев В. К.** Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.

*Поступила в редакцию 8/XII 2004 г.,
в окончательном варианте — 11/III 2005 г.*
