

03;12

Сильные ударные волны в пузырьковых средах

© А.И. Сычев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: sychev@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 29 июля 2009 г.)

Экспериментально исследованы ударные волны в пузырьковых средах. Получены данные о структуре, скорости распространения и давлении падающих и отраженных от твердой границы ударных волн. Проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета параметров ударных волн.

Введение

Экспериментальному и теоретическому исследованию ударных волн в пузырьковых средах посвящено большое число оригинальных работ: структура и свойства волновых возмущений различной амплитуды и длительности в пузырьковых средах были исследованы в [1–8]; взаимодействие ударных волн слабой ($\Delta P/P_0 \ll 1$, здесь $\Delta P = P_1 - P_0$, P_1 — давление ударной волны, P_0 — начальное давление пузырьковой среды) и умеренной ($\Delta P/P_0 \sim 1$) интенсивности с отражающими поверхностями изучалось в [9–11]. Результаты работ, посвященных изучению волновых процессов в пузырьковых средах, обобщены в монографиях [12–14]: установлено, что характеристики ударных волн определяются параметрами пузырьковых сред и зависят от амплитуды самой волны; с увеличением давления ударной волны меняется, в частности, ее структура. Процессы распространения и отражения от твердой преграды сильных ударных волн ($\Delta P/P_0 \gg 1$) с амплитудой > 2 МПа в пузырьковых средах не исследованы.

Цель настоящей работы — изучение сильных ударных волн в пузырьковых средах.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования ударных волн в пузырьковых средах проведены в вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 40 мм, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, в которой пузырьки диаметром 2.5 ± 0.1 мм создавались при прохождении газа через систему капилляров. Объемная концентрация газовой фазы пузырьковой среды варьировалась в диапазоне $0.5 \leq \beta_0 \leq 6\%$. Высота столба пузырьковой среды составляла 3.55 м. Давление на поверхности жидкости с пузырьками газа было равно атмосферному. Опыты проведены в помещении при температуре $T = 288$ К.

Ударные волны в пузырьковой среде генерировали сжиганием ацетилено-кислородной стехиометрической смеси ($C_2H_2 + 2.5 O_2$) в секции высокого давления ударной трубы [15]. Амплитуду (давление) ударных волн

варьировали изменением начального давления газовой смеси $C_2H_2 + 2.5 O_2$. При этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, которое развивается над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления [16].

Параметры ударных волн регистрировались установленными по длине ударной трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы которых фиксировали цифровыми осциллографами С9-16 (постоянная времени датчиков давления составляла 8.4 ms). Датчики давления тарировали ударными и детонационными волнами в газах.

Изучены следующие пузырьковые среды $L(\alpha)-G$, где $L(\alpha)$ — жидкость (liquid), G — газ (gas): $L(\alpha)$ — водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0.25, 0.5$ и 0.7 (вязкость жидкости $\mu = 1.01 \cdot 10^{-3}, 2.27 \cdot 10^{-3}, 6.84 \cdot 10^{-3}$ и $27.10 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность жидкости $\rho_l = 1000, 1065, 1130$ и 1182 кг/м³; скорость звука в жидкостях, определяемая по скорости распространения слабых ударных волн, $c_l = 1370, 1470, 1580$ и 1660 м/с); G — пузырьки газа (аргон или азот).

Экспериментальные результаты

Ударные волны в пузырьковых средах имеют пульсационную структуру (рис. 1, здесь x — расстояние от датчиков давления до торца ударной трубы) — на фронте и за фронтом ударной волны наблюдаются интенсивные пульсации давления; через 200–300 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.) С увеличением давления ударной волны амплитуда пульсаций возрастает. Стохастический характер пульсаций давления ударной волны обусловлен случайным распределением пузырьков газа в жидкости. На рис. 1, b можно наблюдать процесс отражения ударной волны от твердой преграды — торца ударной трубы.

На рис. 2, 3 представлены данные измерений скорости распространения ударных волн в пузырьковых средах

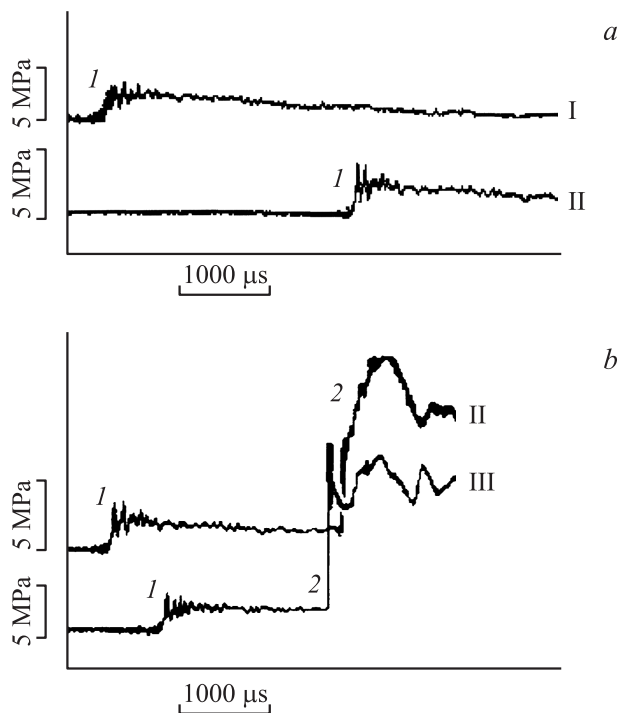


Рис. 1. Осциллограммы давления падающей (1) и отраженной (2) ударных волн. $\alpha = 0.25$, $G-N_2$; a, b — $\beta_0 = 4\%$; x — расстояние от датчиков давления до торца ударной трубы, m : I — 1.13, II — 0.535, III — 0.405.

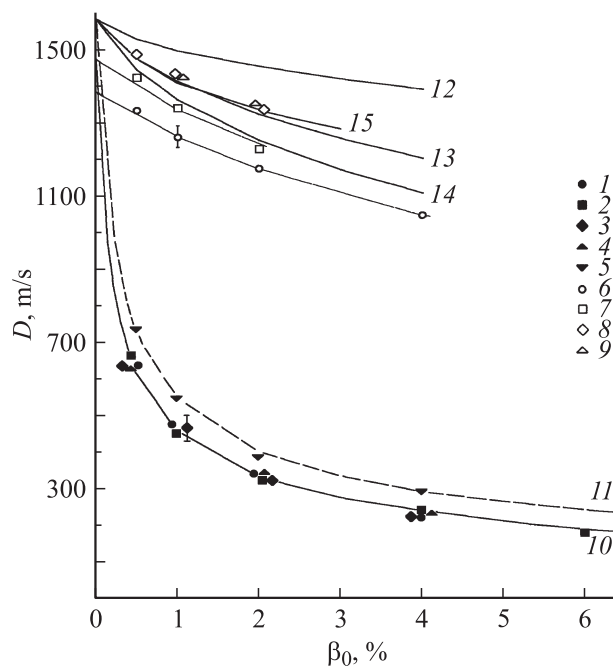


Рис. 2. Зависимости $D(\beta_0)$. $\alpha = 0$ (1, 6), 0.25 (2, 7) и 0.5 (3–5, 8, 9–15), $G-N_2$ (1–3, 6–8, 13) и Ar (4, 5, 9–11, 14); $P_1 = 2.4$ (1–4, 6–10, 12–15) и 3.6 (5, 11) МПа; $D \equiv D_1$ (1–5, 10, 11) — падающие и $D \equiv D_2$ (6–9, 12–15) — отраженные ударные волны; 10–15 — расчет: $n = 1$ (10–12, 15) и γ (13, 14) ($\gamma = 1.4$ (13) и 1.67 (14)).

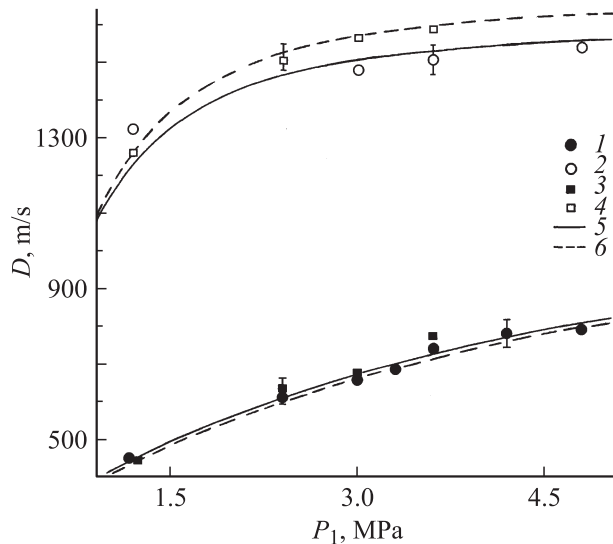


Рис. 3. Зависимости $D(P_1)$. $\alpha = 0.5$ (1, 2, 5) и 0.7 (3, 4, 6), $G-Arg$; $\beta_0 = 0.5\%$; $D \equiv D_1$ (1, 3) — падающие и $D \equiv D_2$ (2, 4) — отраженные ударные волны; 5, 6 — расчет.

(каждая точка на графиках — среднее значение данных нескольких опытов). Измерения скорости ударных волн проводили с помощью датчиков давления на двух участках ударной трубы с базой 0.595 и 0.470 м (расстояние от поверхности пузырьковой среды до середины базы равно 2.72 и 3.25 м соответственно). Ударные волны являются стационарными: значения скорости волн на различных расстояниях от поверхности пузырьковой среды практически совпадают.

Скорость распространения падающих ударных волн D_1 уменьшается с повышением концентрации газовой фазы пузырьковой среды β_0 (см. рис. 2) и возрастает при увеличении амплитуды ударной волны P_1 (см. рис. 3). Влияние свойств газов, содержащихся в пузырьках, на характеристики ударных волн оказывается незначительным: скорости ударных волн в системах с пузырьками одно- и двухатомных газов, физические свойства которых различны, имеют близкие значения. Данный факт указывает, в частности, на изотермичность процесса сжатия пузырьковой среды в ударной волне.

Характер зависимости скорости распространения отраженных от твердой границы ударных волн D_2 от концентрации газовой фазы пузырьковой среды β_0 качественно такой же, как и в случае падающих на твердую границу ударных волн: с повышением начальной концентрации газовой фазы скорость отраженных ударных волн уменьшается (см. рис. 2). С увеличением амплитуды скорость падающей ударной волны растет, при этом амплитуда и скорость отраженной ударной волны также повышаются (см. рис. 3). Скорости отраженных ударных волн в системах с пузырьками одно- и двухатомных газов имеют близкие значения.

Ударные волны (как падающая, так и отраженная) в жидкостях распространяются со скоростью звука в жидкостях.

Влияние свойств жидкого компонента пузырьковой среды на скорость ударных волн проявляется лишь для отраженных ударных волн, т.е. для волн, скорость распространения которых близка к скорости звука в жидкости. Влияние других свойств жидкостей (помимо скорости звука) на скорость ударных волн незначительно.

На рис. 2 представлены также расчетные значения скорости распространения падающих и отраженных ударных волн.

Теоретический анализ

Рассмотрим взаимодействие ударной волны с твердой отражающей границей. Пусть ударная (падающая) волна распространяется со скоростью D_1 в неподвижной в лабораторной системе отсчета пузырьковой среде. Запишем уравнения сохранения массы и импульса (соотношения Рэнкина–Гюгоньо), связывающие параметры пузырьковой среды по обе стороны фронта стационарной ударной волны:

$$\rho_0 D_1 = \rho_1 (D_1 - u_1), \quad (1)$$

$$P_0 + \rho_0 D_1^2 = P_1 + \rho_1 (D_1 - u_1)^2. \quad (2)$$

Здесь P_0 , ρ_0 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 из состояния с параметрами (P_0, ρ_0, u_0) в состояние с параметрами (P_1, ρ_1, u_1) , здесь $u_0 = 0$ — скорость потока среды перед фронтом ударной волны.

Далее, пузырьковая среда с параметрами P_1 и ρ_1 натекает со скоростью u_1 на твердую границу. В результате взаимодействия с неподвижной границей среда останавливается и образуется отраженная ударная волна.

Запишем уравнения сохранения массы и импульса, связывающие параметры пузырьковой среды по обе стороны фронта отраженной ударной волны, распространяющейся в сжатой падающей ударной волной пузырьковой среде со скоростью D_2 :

$$\rho_1 (D_2 + u_1) = \rho_2 D_2, \quad (3)$$

$$P_1 + \rho_1 (D_2 + u_1)^2 = P_2 + \rho_2 D_2^2. \quad (4)$$

Здесь P_1 , ρ_1 и P_2 , ρ_2 — давление и плотность пузырьковой среды перед и за фронтом отраженной волны соответственно. Таким образом, отраженная волна переводит пузырьковую среду из состояния с параметрами (P_1, ρ_1, u_1) в состояние с параметрами (P_2, ρ_2, u_2) , здесь $u_2 = 0$ — скорость потока среды за отраженной ударной волной.

Для получения расчетных формул из уравнений (1)–(4) необходимо привлечение уравнения состояния пузырьковых сред. Пренебрегая изменением температуры жидкости в процессе ударного перехода, запишем

уравнения состояния жидкого и газового компонентов среды.

Для исследуемого диапазона давлений ударных волн сжимаемость жидкого компонента пузырьковых сред можно учесть в акустическом приближении. Имеем: $P_1 - P_0 = c_l^2 (\rho_1^l - \rho_0^l)$, здесь c_l — скорость звука в жидкости, ρ_0^l и ρ_1^l — плотность жидкости перед и за фронтом падающей ударной волны соответственно; $P_2 - P_1 = c_l^2 (\rho_2^l - \rho_1^l)$, здесь ρ_1^l и ρ_2^l — плотность жидкости перед и за фронтом отраженной ударной волны соответственно.

Сжимаемость газового компонента пузырьковых сред опишем в общем случае: полагаем, что при взаимодействии пузырьков с ударной волной газ совершает политропный процесс, имеем: $\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{\rho_1^{\text{gas}}}{\rho_0^{\text{gas}}}\right)^n$, здесь ρ_0^{gas} и ρ_1^{gas} — плотность газа в пузырьках перед и за фронтом падающей ударной волны соответственно, n — показатель политропы ($1 \leq n \leq \gamma$, где γ — показатель адиабаты Пуассона); $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2^{\text{gas}}}{\rho_1^{\text{gas}}}\right)^n$, здесь ρ_1^{gas} и ρ_2^{gas} — плотность газа в пузырьках перед и за фронтом отраженной волны соответственно.

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

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{1 - \alpha_0}{\rho_0^l} + \frac{\alpha_0}{\rho_0^{\text{gas}}} \approx \frac{1}{\rho_0^l} + \frac{\alpha_0}{\rho_0^{\text{gas}}}$$

$$\text{или } \rho_0 = (1 - \beta_0)\rho_0^l + \beta_0\rho_0^{\text{gas}} \approx (1 - \beta_0)\rho_0^l,$$

здесь α_0 и β_0 — массовая и объемная концентрация газовой фазы пузырьковой среды соответственно, $\alpha_0 = \frac{\beta_0\rho_0^{\text{gas}}}{\rho_0}$;

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho_1^l} + \frac{\alpha_1}{\rho_1^{\text{gas}}} \approx \frac{1}{\rho_1^l} + \frac{\alpha_1}{\rho_1^{\text{gas}}},$$

здесь α_1 — массовая концентрация газовой фазы пузырьковой среды за фронтом падающей ударной волны;

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{1 - \alpha_2}{\rho_2^l} + \frac{\alpha_2}{\rho_2^{\text{gas}}} \approx \frac{1}{\rho_2^l} + \frac{\alpha_2}{\rho_2^{\text{gas}}},$$

здесь α_2 — массовая концентрация газовой фазы пузырьковой среды за фронтом отраженной ударной волны.

Отметим, что $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2$.

Получаем расчетные формулы:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_2}{P_0} - \frac{P_1}{P_0}\right) \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n}}{\frac{P_2}{P_0} - \frac{P_1}{P_0}}\right]^{1/2} \\ &= \left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right) \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n}}{\frac{P_1}{P_0} - 1}\right]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

— давление за фронтом отраженной ударной волны в зависимости от давления падающей ударной волны

(здесь и далее $\rho_l \equiv \rho_0^l$);

$$D_1 = \frac{c_l}{1 - \beta_0} \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n}}{\frac{P_1}{P_0} - 1} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

— скорость распространения падающей ударной волны;

$$D_2 = c_l \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n}}{\frac{P_2}{P_0} - \frac{P_1}{P_0}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

— скорость распространения отраженной ударной волны;

$$u_1 = \frac{\left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right)}{c_l \frac{\rho_l}{P_0}} \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n}}{\frac{P_1}{P_0} - 1} \right]^{1/2} \quad (8)$$

— скорость потока среды за фронтом падающей ударной волны.

Анализ и обсуждение результатов

Расчет скорости распространения падающих и отраженных ударных волн проведем по формулам (5)–(7) в двух предельных случаях: при $n = 1$ (изотермический процесс) — модель „теплового равновесия пузырьков газа и жидкости“, при $n = \gamma$ (адиабатный процесс) — модель „теплоизолированных пузырьков газа“.

При заданной концентрации газовой фазы пузырьковой среды скорости распространения падающих ударных волн в средах с пузырьками одноатомного и двухатомного газов, вычисленные по обеим моделям, имеют практически совпадающие значения. Расчетные величины скорости падающих ударных волн согласуются с экспериментальными данными (см. рис. 2, 3). Отметим, что формула (6) находится в согласии с формулами для расчета скорости распространения ударных волн в пузырьковых средах, полученными в работах [3,13].

В отличие от падающих ударных волн значения скорости распространения отраженных волн, полученные по модели теплового равновесия и по модели теплоизолированных пузырьков, различны (см. рис. 2). При заданной концентрации газовой фазы пузырьковой среды скорость отраженных ударных волн уменьшается с увеличением показателя адиабаты газа, содержащегося в пузырьках.

Для отраженных ударных волн экспериментальные данные и результаты расчета скорости распространения, полученные по обеим моделям, имеют расхождение, возрастающее с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды (см. рис. 2). С учетом того обстоятельства, что в эксперименте отсутствует зависимость скорости отраженных волн от сорта газа, содержащегося в пузырьках, поэтому для расчета скорости отраженных волн необходимо использовать модель „теплового равновесия пузырьков газа и жидкости“, имеющуюся

расхождение экспериментальных данных и результатов расчета следует признать существенным.

Рассмотрим возможные причины расхождения данных эксперимента и результатов расчета. Формула (5), устанавливающая связь давлений падающей и отраженной ударных волн, получена в предположении отражения падающей ударной волны от абсолютно жесткой преграды. Учет конечного волнового сопротивления материала отражающей поверхности можно провести по формуле

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_2}{P_0} - \frac{P_1}{P_0}\right) \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n}}{\frac{P_2}{P_0} - \frac{P_1}{P_0}} \right]^{1/2} \\ & + \left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right) \frac{\rho_l c_l}{\rho_m c_m} \\ & = \left(\frac{P_1}{P_0} - 1\right) \left[1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} c_l^2 \frac{\rho_l}{P_0} \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n}}{\frac{P_1}{P_0} - 1} \right]^{1/2}, \end{aligned}$$

здесь ρ_m и c_m — плотность материала отражающей поверхности и скорость звука в твердом теле соответственно. Расчет, проведенный по приведенной формуле, дает значения скорости отраженных волн, лишь на несколько процентов меньше, чем при расчете по формуле для случая отражения ударной волны от абсолютно жесткой преграды.

Наблюдаемое расхождение экспериментальных данных и результатов расчета обусловлено проявлением следующего обстоятельства: ударная труба, используемая в эксперименте, имеет конструктивные особенности, определяемые техникой создания пузырьков газа в жидкости, — в торце ударной трубы располагался генератор пузырьков (латунная форсунка толщиной 5 мм с укрепленными в ней капиллярными трубками, находившаяся на расстоянии 1 мм от стального торца толщиной 35 мм). Таким образом, отражение падающей ударной волны происходит от преграды, имеющей конечную толщину. В этих условиях процесс отражения ударной волны является нерегулярным, и давление и скорость отраженной ударной волны имеют меньшие значения, чем в случае стационарной отраженной ударной волны.

Расчет скорости распространения отраженных ударных волн, проведенный с использованием экспериментально установленных зависимостей отношения давлений отраженной и падающей ударных волн P_2/P_1

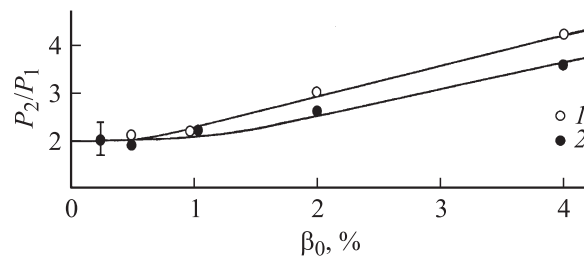


Рис. 4. Зависимости $P_2/P_1(\beta_0)$. $\alpha = 0.5$, $G - \text{Ar}$; $P_1 = 2.4$ (1) и 3.6 (2) МПа.

от концентрации газовой фазы пузырьковой среды β_0 (см. рис. 4), дает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными (см. рис. 2, 3).

Таким образом, при проведении исследований взаимодействия ударных волн с отражающими поверхностями необходимо соблюдение условий, обеспечивающих образование стационарных отраженных ударных волн.

Скорость движения среды за фронтом падающей ударной волны, согласно формуле (8), возрастает с увеличением амплитуды волны и при повышении концентрации газовой фазы пузырьковой среды. Для ударных волн с амплитудой $P_1 \leq 10$ МПа в пузырьковых средах с концентрацией газовой фазы $\beta_0 \leq 10\%$ массовая скорость $u_1 \leq 32.5$ м/с.

Заключение

Исследования ударных волн в пузырьковых средах показали, что ударные волны имеют пульсационную структуру; с увеличением давления ударной волны амплитуда пульсаций возрастает. Скорость ударных волн уменьшается с повышением концентрации газовой фазы пузырьковой среды и возрастает при увеличении амплитуды падающей ударной волны. Влияние физических свойств газов, содержащихся в пузырьках, и свойств жидкостей (помимо скорости звука) на скорость распространения ударных волн незначительно.

При взаимодействии с твердой преградой ударная волна трансформируется — образуется отраженная ударная волна. Скорость и давление отраженной ударной волны определяются параметрами пузырьковых сред и зависят от давления падающей ударной волны: скорость распространения отраженной волны возрастает при повышении давления падающей волны и уменьшается при увеличении концентрации газовой фазы среды; давление отраженной волны возрастает при повышении амплитуды падающей волны и при увеличении концентрации газовой фазы пузырьковой среды.

Результаты расчета скорости распространения падающих ударных волн в пузырьковых средах согласуются с экспериментальными данными. Для отраженных ударных волн имеется совпадение опытных и расчетных данных при использовании экспериментально установленных отношений давлений отраженной и падающей ударных волн.

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

Список литературы

- [1] *Иорданский С.В.* // Прикл. механика и техн. физика. 1960. № 6. С. 102–110.
- [2] *Когарко Б.С.* // ДАН СССР. 1961. Т. 137. № 6. С. 1331–1333.
- [3] *Бэтчелор Г.К.* Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости. Механика. М.: Мир, 1963. Т. 3. № 109. С. 65–84.
- [4] *Кедринский В.К.* // Прикл. механика и техн. физика. 1968. № 4. С. 29–35.
- [5] *Кутателадзе С.С., Бурдуков А.П., Кузнецов В.В.* и др. // ДАН СССР. 1972. Т. 207. № 2. С. 313–315.
- [6] *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко Б.С., Когарко С.М.* // ДАН СССР. 1973. Т. 213. № 5. С. 1043–1046.
- [7] *Кедринский В.К.* // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16. № 5. С. 14–25.
- [8] *Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Марков П.Г., Накоряков В.Е.* // Акуст. журн. 1989. Т. 35. Вып. 1. С. 157–159.
- [9] *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Тимофеев Е.И.* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 2. С. 174–178.
- [10] *Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И.* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 2. С. 159–162.
- [11] *Донцов В.Е.* // Прикл. механика и техн. физика. 1998. № 5. С. 19–24.
- [12] *Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.* Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1983. 237 с.
- [13] *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
- [14] *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
- [15] *Сычев А.И.* // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
- [16] *Сычев А.И.* // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.