

УДК 532.546.532.549.5

## ОТРАЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ В СУСПЕНЗИИ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ И ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ

© 1999 г. В. Е. Донцов, Б. Г. Покусаев

Институт теплофизики СО РАН  
630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1  
E-mail: dontsov@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.05.98 г.

Экспериментально исследовано отражение ударных волн давления умеренной интенсивности от твердой стенки в жидкости с твердыми частицами и пузырьками газа (инертного и легкорастворимого в жидкости). Проведено сравнение опытных данных с расчетами по известным математическим моделям. Изучен процесс растворения газа за ударной волной в трехфазной суспензии.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] теоретически и экспериментально исследовано отражение волн давления умеренной интенсивности от твердой границы в жидкости с пузырьками газа. Показано, что процесс отражения волн носит существенно нелинейный характер. В [4] на основе численных расчетов процесса захлопывания слоя кавитационных пузырьков у твердой стенки было обнаружено возникновение импульсов давления большой амплитуды, обусловленных инерционными эффектами коллективного схлопывания пузырьков. В работе [5] показано, что в жидкости с пузырьками легкорастворимого газа происходит усиление ударных волн при отражении от твердой границы. В [6, 7] экспериментально исследованы процесс растворения газа за ударной волной в жидкости с пузырьками легкорастворимого газа, влияние растворения газа на эволюцию волны и усиление ударной волны при отражении от твердой границы. Теоретическое и экспериментальное исследования эволюции и структуры слабонелинейных возмущений давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками выполнены в работах [8, 9]. В работе [10] представлена модель распространения нелинейных акустических волн в трехфазной смеси. Получены эволюционные уравнения, объясняющие некоторые экспериментальные данные по динамике волн в трехфазных средах. Авторами работ [11, 12] рассмотрены эффекты межфазного взаимодействия в многофазных дисперсных системах, включая фазовый переход и химические реакции. Исследованы устойчивость межфазных границ в многофазных средах и динамика твердых и газовых включений.

Целью данной работы является экспериментальное исследование отражения ударных волн давления умеренной интенсивности от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частица-

ми и газовыми пузырьками; сравнение опытных данных с полученными расчетными зависимостями; изучение процесса растворения газа за ударной волной.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим отражение одномерных ударных волн от твердой стенки в трехфазной среде на основе адиабатической модели Ляхова [13]. Модель нелинейной жидкости многокомпонентной среды без вязкости [13] дает выражение для скорости падающей и отраженной ударных волн:

$$U_0 = \left( \frac{P_1 - P_0}{\rho_0} \left( 1 - m_0 \Phi_0 \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - (1 - \Phi_0) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times m_0 \left( \frac{\gamma^* (P_1 - P_0)}{\rho_{20} c_2^2} + 1 \right)^{\frac{1}{\gamma^*}} - \right. \right. \\ \left. \left. - (1 - m_0) \left( \frac{\gamma^{**} (P_1 - P_0)}{\rho_{10} c_1^2} + 1 \right)^{\frac{-1}{\gamma^{**}}} \right)^{-1} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

$$U_1 = \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho_1} \left( 1 - m_1 \Phi_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - (1 - \Phi_1) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times m_1 \left( \frac{\gamma^* (P_2 - P_1)}{\rho_{20} c_2^2} + 1 \right)^{\frac{1}{\gamma^*}} - \right. \right. \\ \left. \left. - (1 - m_1) \left( \frac{\gamma^{**} (P_2 - P_1)}{\rho_{10} c_1^2} + 1 \right)^{\frac{-1}{\gamma^{**}}} \right)^{-1} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

$$\rho_0 = \rho_{10}(1 - m_0) + \rho_{20}m_0(1 - \Phi_0) + \rho_{30}m_0\Phi_0, \quad (3)$$

$$\rho_1 = \rho_{10}(1 - m_1) + \rho_{20}m_1(1 - \Phi_1) + \rho_{30}m_1\Phi_1. \quad (4)$$

$U_1$  – скорость отраженной волны относительно среды перед волной;  $\rho_0, \rho_1$  – плотности трехфазной смеси перед и за фронтом падающей на стенку ударной волны,  $\rho_{10}, \rho_{20}, \rho_{30}$  – плотности твердой, жидкой и газовой фаз перед фронтом ударной волны;  $m_0, m_1$  – пористости трехфазной смеси перед и за фронтом волны;  $\varphi_0, \varphi_1$  – объемные газосодержания в жидкости перед и за фронтом волны, следовательно  $m_0\varphi_0, m_1\varphi_1$  – объемные газосодержания перед и за фронтом волны в трехфазной среде;  $\gamma, \gamma^*, \gamma^{**}$  – показатели адиабаты газа, жидкости и твердой фазы соответственно;  $P_0, P_1, P_2$  – давления перед фронтом, за фронтом падающей на стенку волны и за фронтом отраженной от стенки волны соответственно;  $c_1, c_2$  – скорости звука в твердой и жидкой фазе.

Если считать, что твердая и жидкая фазы несжимаемы, а поведение газа в пузырьках адиабатическое, то объемное газосодержание и пористость за фронтом ударной волны имеют вид:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \left( (1 - \varphi_0) \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \varphi_0 \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$m_1 = \frac{m_0(1 - \varphi_0)}{(1 - \varphi_1) + m_0(\varphi_1 - \varphi_0)}. \quad (6)$$

Согласно приближению эффективной вязкости для описания стационарных ударных волн, условие отражения стационарной ударной волны от твердой стенки в трехфазной смеси можно записать в виде [14]:

$$\frac{P_1 - P_0}{\rho_0 U_0} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 U_1}. \quad (7)$$

Соответственно, выражение для скорости отраженной ударной волны относительно стенки имеет вид [14]:

$$U_2 = U_1 - \frac{P_1 - P_0}{\rho_0 U_0}. \quad (8)$$

Скорость волны разрежения, отраженной от свободной поверхности трехфазной среды, равна скорости звука в трехфазной смеси за фронтом отраженной от твердой стенки ударной волны. Она имеет вид [13]:

$$c_R = \left( \rho_0 \left( \frac{m_2 \varphi_2}{\gamma P_2} + \frac{m_2(1 - \varphi_2)}{\rho_{20} c_2^2} + \frac{(1 - m_2)}{\rho_{10} c_1^2} \right) \right)^{-0.5}, \quad (9)$$

$$\varphi_2 = \varphi_0 \left( (1 - \varphi_0) \left( \frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \varphi_0 \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$m_2 = \frac{m_0(1 - \varphi_0)}{(1 - \varphi_2) + m_0(\varphi_2 - \varphi_0)}, \quad (11)$$

$\varphi_2, m_2$  – объемное газосодержание в жидкости и пористость за фронтом отраженной ударной волны.

Полученные выражения (1)–(11) позволяют рассчитать амплитуду и скорость отраженной от твердой стенки ударной волны в трехфазной среде, а также скорость волны разрежения, отраженной от свободной поверхности трехфазной среды в адиабатическом приближении Ляхова.

Рассмотрим отражение ударных волн от твердой стенки в трехфазной среде с использованием равновесной модели Нигматулина для эволюции волн в газожидкостной смеси [14]. В качестве жидкой фазы возьмем суспензию жидкости с твердыми частицами с эффективной плотностью и скоростью звука [9]:

$$\rho_{m0} = (\rho_{10}(1 - m_0) + \rho_{20}m_0(1 - \varphi_0))/(1 - m_0\varphi_0),$$

$$c_{m0} = \left( \frac{\rho_{20}c_2^2}{(\rho_{10}(1 - m_0) + \rho_{20}m_0)m_0} \right)^{0.5}. \quad (12)$$

Выражения для скорости падающей и отраженной ударных волн в этой модели имеют вид:

$$U_0 = \left[ \frac{P_1}{\rho_{m0}(1 - m_0\varphi_0)m_0\varphi_0} \times \right. \quad (13)$$

$$\left. \times \frac{1 + \left( \frac{P_1}{P_0} - 1 \right) \frac{P_0 m_0 \rho_{m0}^*}{\rho_{20} c_2^2 \rho_{m0}}}{1 + \left( \frac{P_1}{P_0} - m_0 \varphi_0 \right) \frac{P_0 \rho_{m0}^*}{\rho_{20} c_2^2 \varphi_0 \rho_{m0}}} \right]^{0.5},$$

$$U_1 = \left[ \frac{P_2}{\rho_{m1}(1 - m_1\varphi_1)m_0\varphi_0} \times \right. \quad (14)$$

$$\left. \times \frac{1 + \left( \frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \frac{P_1 m_1 \rho_{m1}^*}{\rho_{20} c_2^2 \rho_{m1}}}{1 + \left( \frac{P_2}{P_1} - m_1 \varphi_1 \right) \frac{P_1 \rho_{m1}^*}{\rho_{20} c_2^2 \varphi_1 \rho_{m1}}} \right]^{0.5},$$

$$\rho_{m1} = (\rho_{10}(1 - m_1) + \rho_{20}m_1(1 - \varphi_1))/(1 - m_1\varphi_1),$$

$$\rho_{m0}^* = \rho_{10}(1 - m_0) + \rho_{20}m_0,$$

$$\rho_{m1}^* = \rho_{10}(1 - m_1) + \rho_{20}m_1.$$

Выражения (13), (14) с использованием (5)–(8) при  $\gamma = 1$  позволяют вычислить амплитуду и скорость отраженной от твердой стенки ударной волны в трехфазной среде в изотермическом приближении Нигматулина.

Используя равновесную модель Нигматулина и выражение для скорости скачка конденсации в газожидкостной смеси [14], получим закон отражения ударной волны конденсации (растворения) от твердой стенки в трехфазной среде. То есть предполагаем, что в падающей на стенку ударной волне происходит полное растворение газа и отраженная волна распространяется по суспензии жидкости с твердыми частицами без пузырьков газа. В этом случае, как и для двухфазных сред [5], наблюдается значительное усиление амплитуды ударной волны при отражении. Выражение для амплитуды отраженной ударной волны имеет вид

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \left( \frac{c_2^2 \rho_{20} m_0 \Phi_0 \rho_{m1}^* \rho_{m0} (1 - m_0 \Phi_0)}{P_0 m_1 \rho_0^2} \right)^{0.5} \times \frac{P_1}{P_0} \left( \frac{P_1}{P_0} - 1 \right)^{0.5} \quad (15)$$

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты проводились на установке типа “ударная труба” [8]. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу с внутренним диаметром 0.053 м и длиной 2 м, ограниченную снизу твердой стенкой. Рабочий участок частично заполнялся стеклянными шариками диаметром 3 мм. Пористость среды определялась по объему рабочего участка и объему засыпанной в него твердой фазы. Для создания равномерной суспензии через рабочий участок с постоянной скоростью прокачивалась жидкость. В нижней части рабочего участка по его периметру через отверстия диаметром 0.2 мм в жидкость вводились газовые пузырьки. Такой ввод пузырьков позволил получать достаточно большие объемные газосодержания. В качестве рабочей жидкости использовалась вода, а в качестве газовой фазы – воздух и углекислый газ. Для трехфазной среды “твердые шарики–жидкость–пузырьки углекислого газа” вода насыщалась углекислым газом до равновесного состояния при данных начальных условиях (температуре и давлении). Средний размер пузырьков для разных газосодержаний изменялся в пределах (2–4) мм. Среднее по длине рабочего участка газосодержание определялось по измерению расходомером расхода вводимого в жидкость газа. Расходомер тарировался путем вычисления объемного газосодержания в жидкости по скорости ударной волны в трехфазной смеси для данной пористости [8].

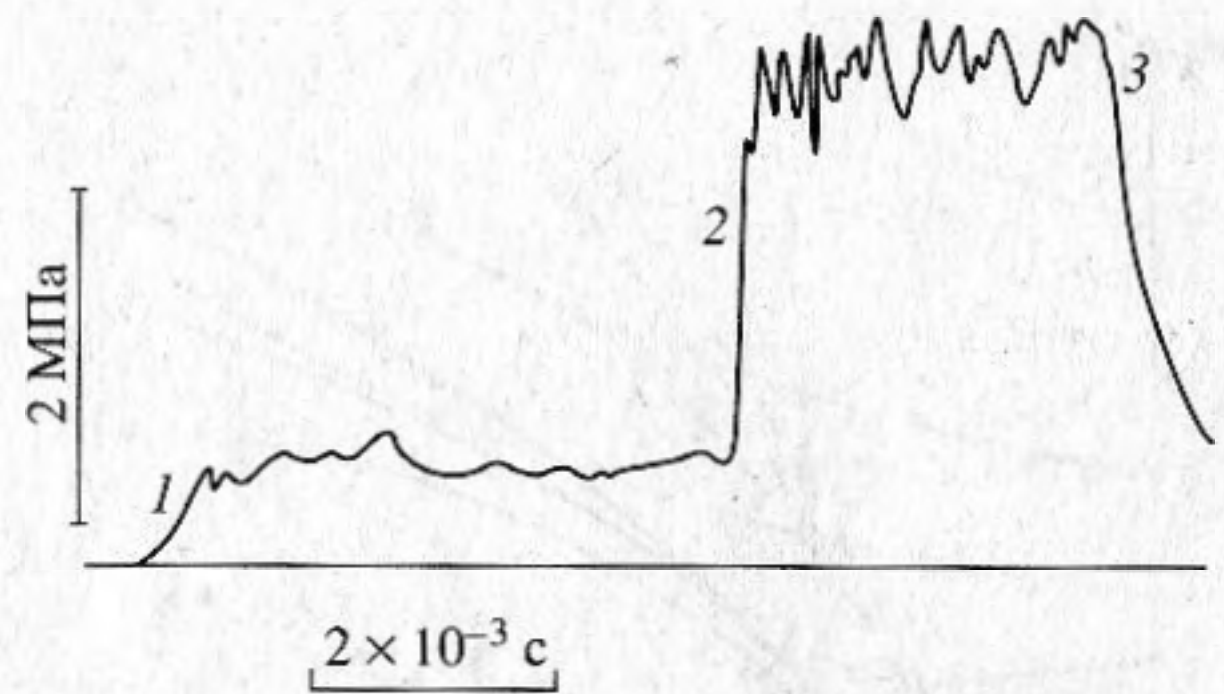


Рис. 1. Профиль волны давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и пузырьками углекислого газа. 1 – падающая, 2 – отраженная от твердой стенки ударная волна, 3 – волна разрежения, отраженная от свободной поверхности трехфазной среды.  $\Phi_0 = 0.1$ .

Волны давления ступенчатой формы создавались разрывом диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления и рабочий участок. Профили волн давления регистрировались шестью пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными по длине рабочего участка и заделанными заподлицо с его внутренней стенкой. Сигналы с датчиков подавались на АЦП (аналогоцифровые преобразователи) и далее обрабатывались на компьютере.

Характерный профиль волны с датчика давления показан на рис. 1. Амплитуда ударной волны в опытах определялась по среднему значению давления за фронтом волны. Скорость ударной волны определялась по разности времен прихода начала фронта волны на два соседних датчика и расстоянию между ними.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведения экспериментов было показано, что при распространении по трехфазной суспензии, как падающая, так и отраженная от твердой стенки ударные волны практически сохраняют свою амплитуду и форму на участке измерения.

На рис. 2 показана зависимость амплитуды ударной волны, отраженной от твердой стенки в жидкости с твердыми частицами и пузырьками воздуха, от амплитуды падающей на стенку ударной волны. Точками 1–3 показаны опытные данные для разных значений начального объемного газосодержания в жидкости. Линиями 4–9 представлены расчеты по различным моделям для разных значений объемного газосодержания: 4, 7 –  $\Phi_0 = 0.05$ ; 5, 8 –  $\Phi_0 = 0.1$ ; 6, 9 –  $\Phi_0 = 0.2$ . Линии 4–6 соответствуют расчету по адиабатической модели Ляхова (1, 2, 7), а линии 7–9 – по изотермической модели Нигматулина (7, 13, 14).

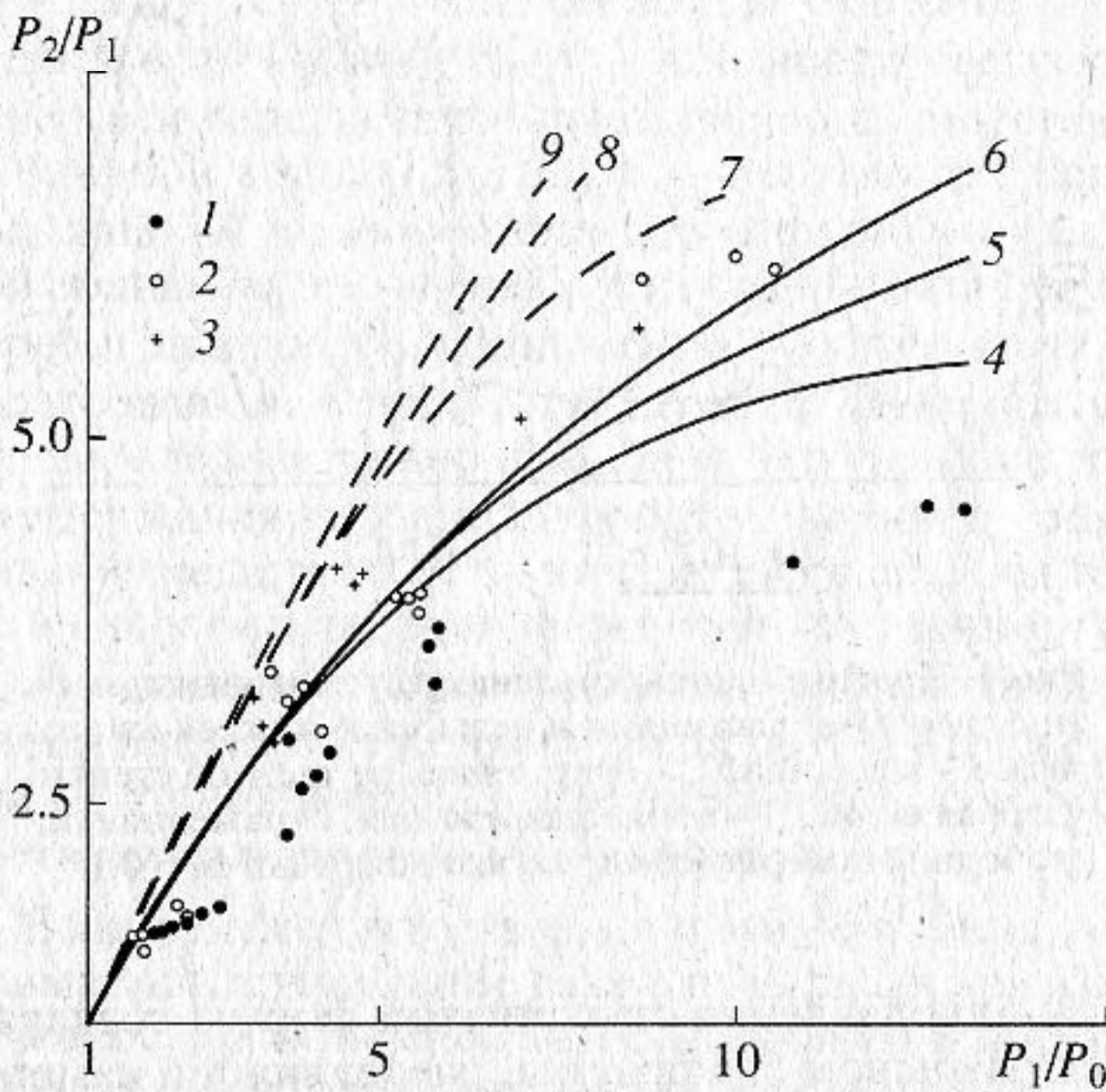


Рис. 2. Амплитуда отраженной от твердой стенки ударной волны в воде со стеклянными шариками и пузырьками воздуха,  $m_0 = 0.59$ . Эксперимент: 1 –  $\varphi_0 = 0.05$ , 2 –  $\varphi_0 = 0.1$ , 3 –  $\varphi_0 = 0.20$ . 4–9 – расчеты.

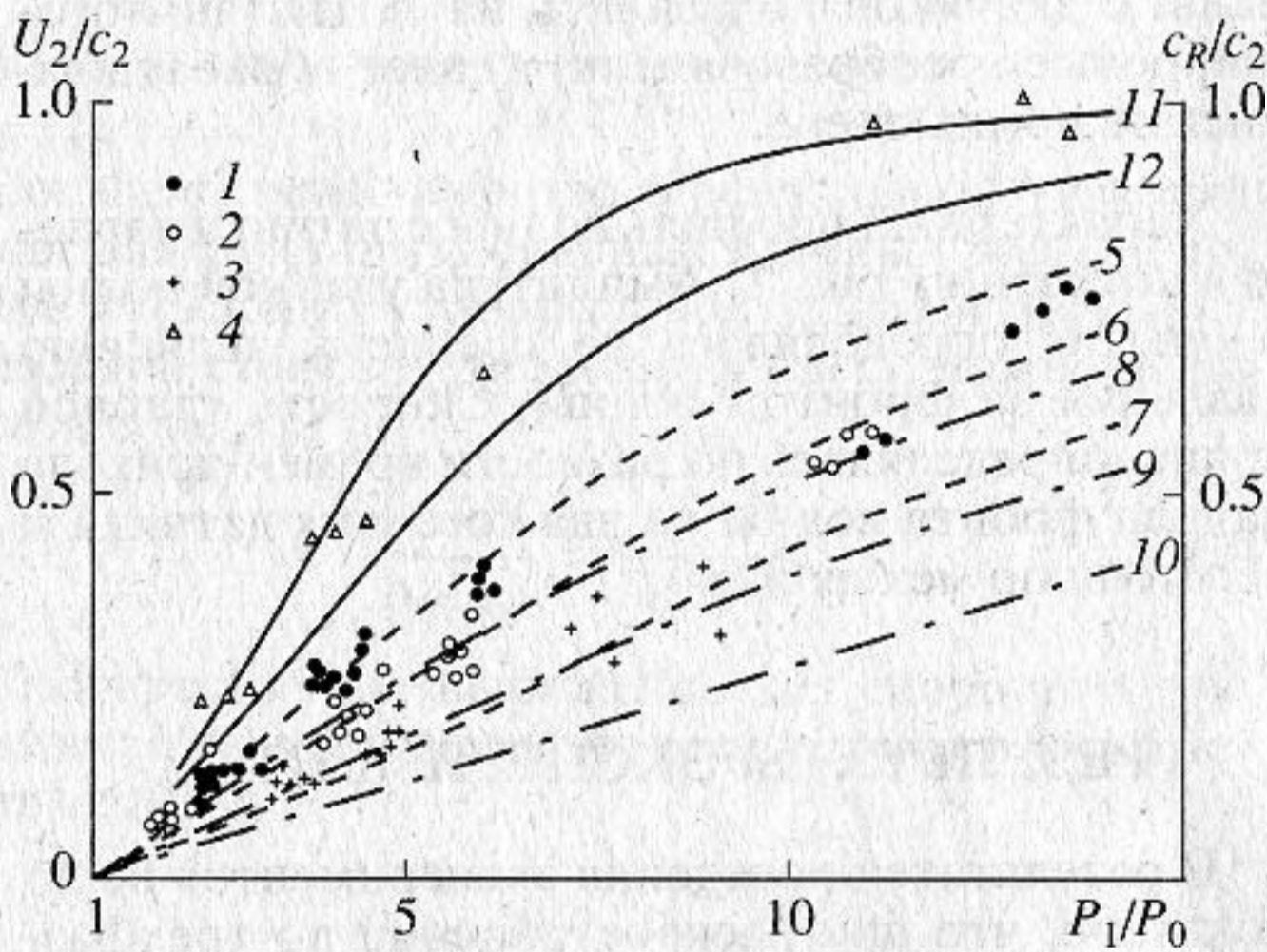


Рис. 3. Скорость отраженной ударной волны  $U_2$  и волны разрежения  $c_R$  в воде со стеклянными шариками и пузырьками воздуха.  $m_0 = 0.59$ . Ударная волна: эксперимент – 1 –  $\varphi_0 = 0.05$ , 2 –  $\varphi_0 = 0.1$ , 3 –  $\varphi_0 = 0.2$ . 5–10 – расчеты. Волна разрежения:  $\varphi_0 = 0.05$ ; 4 – эксперимент, 11, 12 – расчеты.

Видно, что опытные данные для соответствующих значений газосодержаний лучше описываются адиабатическим приближением. Это, по-видимому, связано с тем, что время формирования отраженной ударной волны меньше времени тепловой релаксации газа в пузырьках. Следовательно, газовые пузырьки в течение времени формирования отраженной ударной волны за ее фронтом сжимаются по адиабате.

Достаточно большой разброс экспериментальных точек связан с точностью определения среднего значения давления за фронтом волны, точностью определения объемного газосодержания и неравномерностью распределения газосодержания по длине рабочего участка.

На рис. 3 показаны экспериментальные данные скорости отраженной от твердой стенки ударной волны (1–3) и отраженной от свободной поверхности волны разрежения (4) в жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками. Линиями 5–12 представлены расчеты по различным моделям для разных значений объемного газосодержания: 5, 8, 11, 12 –  $\varphi_0 = 0.05$ ; 6, 9 –  $\varphi_0 = 0.1$ ; 7, 10 –  $\varphi_0 = 0.2$ . Линии 8–10 соответствуют расчету по адиабатической модели Ляхова (1, 2, 7, 8), линии 5–7 – по изотермической модели Нигматулина (7, 8, 13, 14), линии 11, 12 – по (9) при  $\gamma = 1$  и  $\gamma = 1.4$  соответственно.

Видно, что опытные данные для скорости отраженной ударной волны для соответствующих значений газосодержаний хорошо описываются изотермическим приближением. Это обусловлено тем, что отраженная ударная волна распространяется по среде, практически пришедшей в тепловое равновесие после прохождения падающей ударной волны. Исключение составляет лишь область, непосредственно прилегающая к твердой стенке. Измерения скорости отраженной ударной волны проводились на расстоянии более 1 м от дна рабочего участка. Кроме того, как показывают расчеты, скорость отраженной ударной волны в большей степени зависит от тепловой релаксации газа в пузырьках в падающей волне, чем от релаксации газа в отраженной волне.

Экспериментальные точки скорости отраженной от свободной поверхности трехфазной суспензии волны разрежения лежат в области между изотермическим (линия 11) и адиабатическим (линия 12) приближениями.

Отметим, что расчеты по адиабатической модели Ляхова при  $\gamma = 1$  практически совпадают с расчетами по модели Нигматулина при соответствующих  $\varphi_0$ .

Рассмотрим отражение ударной волны от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частицами и пузырьками легкорастворимого в жидкости газа. Было показано, что в трехфазной суспензии с пузырьками легкорастворимого газа происходит значительное усиление ударной волны при отражении от твердой стенки. Как и в трехфазной суспензии с пузырьками воздуха, отраженная ударная волна практически сохраняет свою амплитуду на участке ее измерения.

Зависимость амплитуды ударной волны  $P_2$ , отраженной от твердой стенки в суспензии воды с твердыми частицами и пузырьками углекислого газа, от амплитуды падающей на стенку ударной волны  $P_1$  показана на рис. 4. Точками 1–3 по-

казаны опытные данные для разных значений начального объемного газосодержания в жидкости. Линиями 4–9 представлены расчеты по различным моделям для разных значений объемного газосодержания: 4, 7 –  $\varphi_0 = 0.05$ ; 5, 8 –  $\varphi_0 = 0.1$ ; 6, 9 –  $\varphi_0 = 0.2$ . Линии 4–6 соответствуют расчету по адиабатической модели Ляхова (1, 2, 7), а линии 7–9 – по отражению ударной волны полной конденсации (растворения) – (15).

Видно, что начиная с амплитуд волн  $P_1/P_0 \approx 4$  наблюдается значительное усиление отраженных ударных волн по сравнению с расчетами (4–6), не учитывающими процесс растворения газа в жидкости за волной. С увеличением объемного газосодержания усиление отраженных волн становится более значительным, что согласуется с предложенным в работе [5] механизмом усиления ударных волн в газо-парожидкостных средах. Суть механизма усиления волн связана с переходом кинетической энергии радиального движения жидкости при захлопывании пузырьков в потенциальную энергию давления в жидкости [4, 5]. Для реализации механизма усиления ударных волн необходимо, чтобы растворение газа в пузырьках вследствие диффузионных процессов произошло на временах порядка длительности переднего фронта ударной волны. В противном случае не будет наблюдаться режима ускоряющегося схлопывания пузырьков, приводящего к появлению импульсов давления в жидкости [5]. Одним из факторов, ускоряющих межфазный массообмен и приводящих к усилению волн, как показано в работах [6, 7], является увеличение межфазной поверхности. Это может быть обусловлено дроблением пузырьков в волне.

Расчеты с учетом полного растворения газа в падающей ударной волне (7)–(9) дают лишь качественное соответствие с экспериментом. Это обусловлено тем, что в расчетах (7)–(9) растворение газа происходит мгновенно за фронтом падающей на стенку ударной волны. А это приводит к усилению волн с достаточно малой амплитудой  $P_1/P_0 \approx 1$ . В экспериментах “ударное” растворение (растворение, приводящее к сильному увеличению давления в среде) может происходить лишь при наличии достаточно развитой межфазной поверхности. Вследствие этого усиление в данных экспериментах, как и для газожидкостных сред [6, 7], начинается с больших амплитуд волн.

Следует отметить, что режим усиления ударных волн при отражении от стенки наблюдается только в некотором диапазоне амплитуд волн  $P_1/P_0$ . При  $\varphi_0 = 0.05$  усиление ударных волн при отражении от стенки происходит в диапазоне  $P_1/P_0 = 4–15$ . С увеличением начального объемного газосодержания этот диапазон увеличивается.

Сравнение экспериментальных данных по отражению от твердой стенки ударной волны в трех-

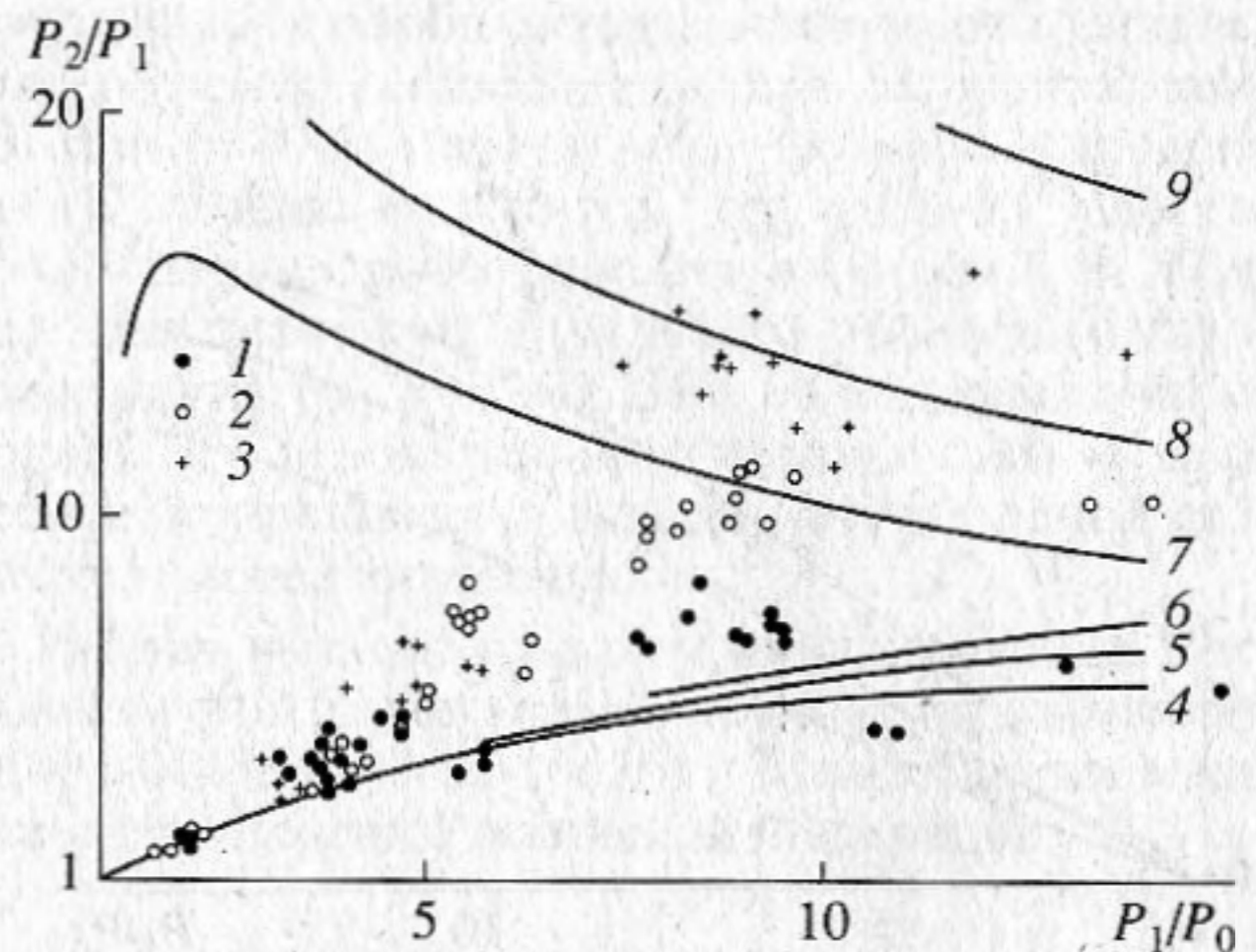


Рис. 4. Усиление ударной волны в воде со стеклянными шариками и пузырьками углекислого газа при отражении от твердой стенки.  $m_0 = 0.59$ . Эксперимент: 1 –  $\varphi_0 = 0.05$ , 2 –  $\varphi_0 = 0.1–0.15$ , 3 –  $\varphi_0 = 0.20–0.25$ . 4–9 – расчеты.

фазной суспензии и газожидкостной смеси [7] показало их хорошее соответствие. Таким образом показано, что наличие в газожидкостной смеси твердой фазы достаточно большой концентрации ( $m_0 = 0.59$ ) не оказывает влияния на усиление ударных волн при отражении от твердой стенки.

Рассмотрим процесс растворения газа в жидкости за падающей на стенку ударной волной в трехфазной суспензии на основе измерения амплитуды и скорости отраженной волны и расчетов по вышеизложенной модели Нигматулина. На рис. 5 точками 1–3 показаны экспериментальные данные скорости отраженной от твердой стенки ударной волны в суспензии жидкости с твердыми частицами и пузырьками углекислого газа, измеренные на определенном отрезке ее распространения –  $U_2$  от амплитуды падающей на стенку ударной волны. Линиями 5–7 приведены расчеты, выполненные по изотермическому приближению Нигматулина (7), (8), (13), (14) для разных значений начальных объемных газосодержаний.

Видно, что для амплитуд волн  $P_1/P_0 > 4$  экспериментальные значения скорости отраженной от твердой стенки ударной волны (1–3) начинают отклоняться от расчетных линий (5–7) для соответствующих значений  $\varphi_0$ . Следовательно, за падающей на стенку ударной волной с амплитудой  $P_1/P_0 > 4$  процесс растворения газа в жидкости становится значительным. Он приводит к существенному уменьшению объемного газосодержания за волной, а значит к увеличению скорости отраженной ударной волны.

Таким образом, если в расчетную модель Нигматулина подставить экспериментальные значения амплитуды и скорости отраженной ударной волны, то можно вычислить объемное газосодер-

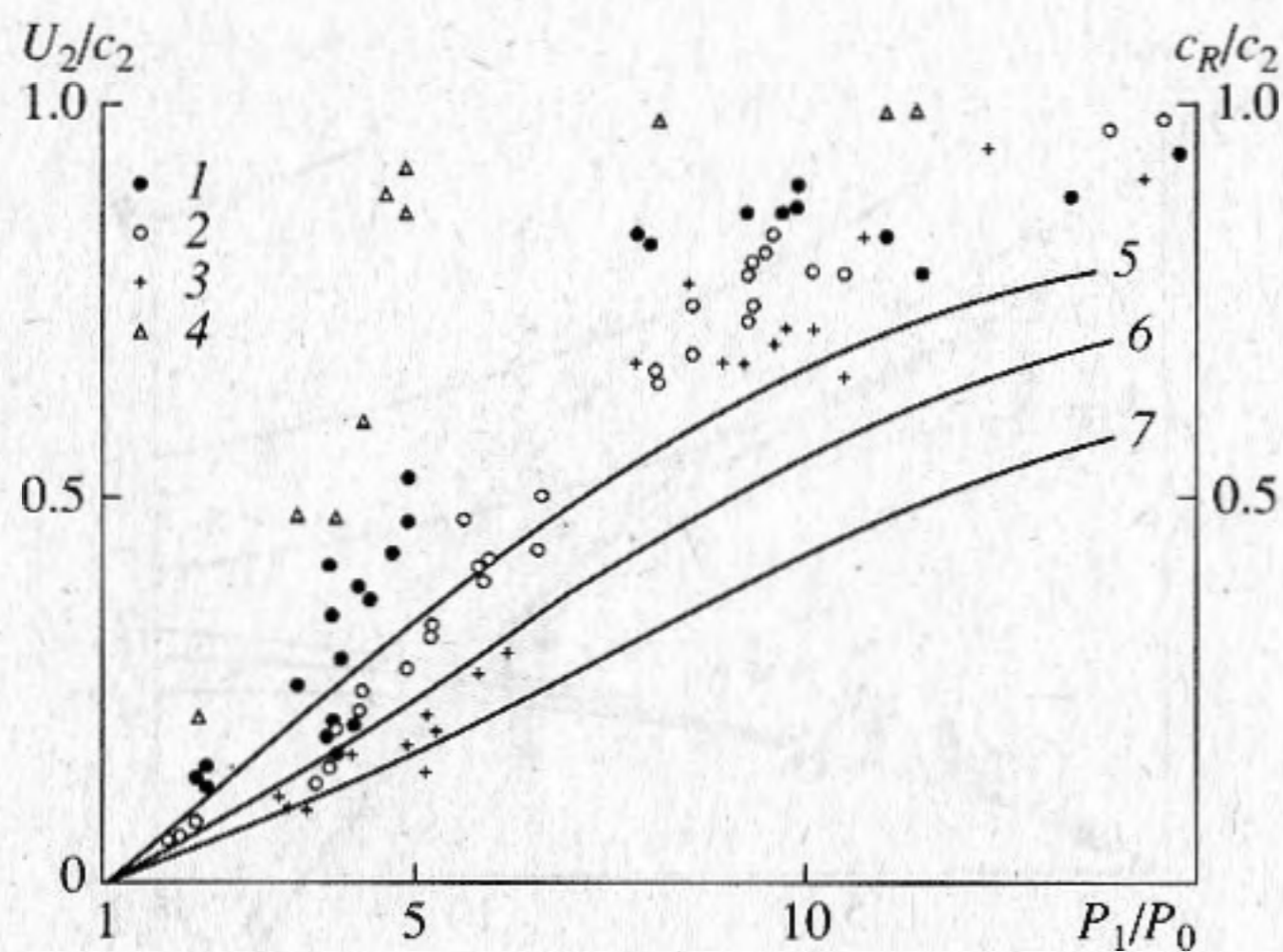


Рис. 5. Скорость отраженной ударной волны  $U_2$  и волны разрежения  $c_R$  в воде со стеклянными шариками и пузырьками углекислого газа.  $m_0 = 0.59$ . Ударная волна: эксперимент — 1 —  $\varphi_0 = 0.05$ , 2 —  $\varphi_0 = 0.1-0.15$ , 3 —  $\varphi_0 = 0.20-0.25$ ; расчет — 5 —  $\varphi_0 = 0.05$ , 6 —  $\varphi_0 = 0.1$ , 7 —  $\varphi_0 = 0.20$ . Волна разрежения: эксперимент — 4 —  $\varphi_0 = 0.05$ .

жание за падающей ударной волной с учетом процесса растворения газа в жидкости —  $\varphi_1^*$ . Если скорость отраженной ударной волны измерять на отдельных коротких участках ее распространения, то можно вычислить значения  $\varphi_1^*$  для разных времен нахождения газовой фазы за фронтом падающей ударной волны. Соответственно можно вычислить относительную величину растворенного газа за ударной волной:

$$\varphi_* = (\varphi_1 - \varphi_1^*) / \varphi_1, \quad (16)$$

где  $\varphi_1$  — рассчитанное по (5) значение объемного газосодержания за ударной волной без учета процесса растворения при значении  $\gamma = 1$ .

Точками 4 на рис. 5 представлены экспериментальные данные по скорости отраженной от свободной поверхности трехфазной суспензии волны разрежения  $c_R$ . Видно, что для амплитуд волн  $P_1/P_0 > 10$  скорость волны разрежения практически равна скорости звука в суспензии жидкости с твердыми частицами (12). Следовательно для таких амплитуд волн на фронте отраженной от стенки ударной волны газосодержание стремится к нулю. А отраженная ударная волна является практически волной полного растворения.

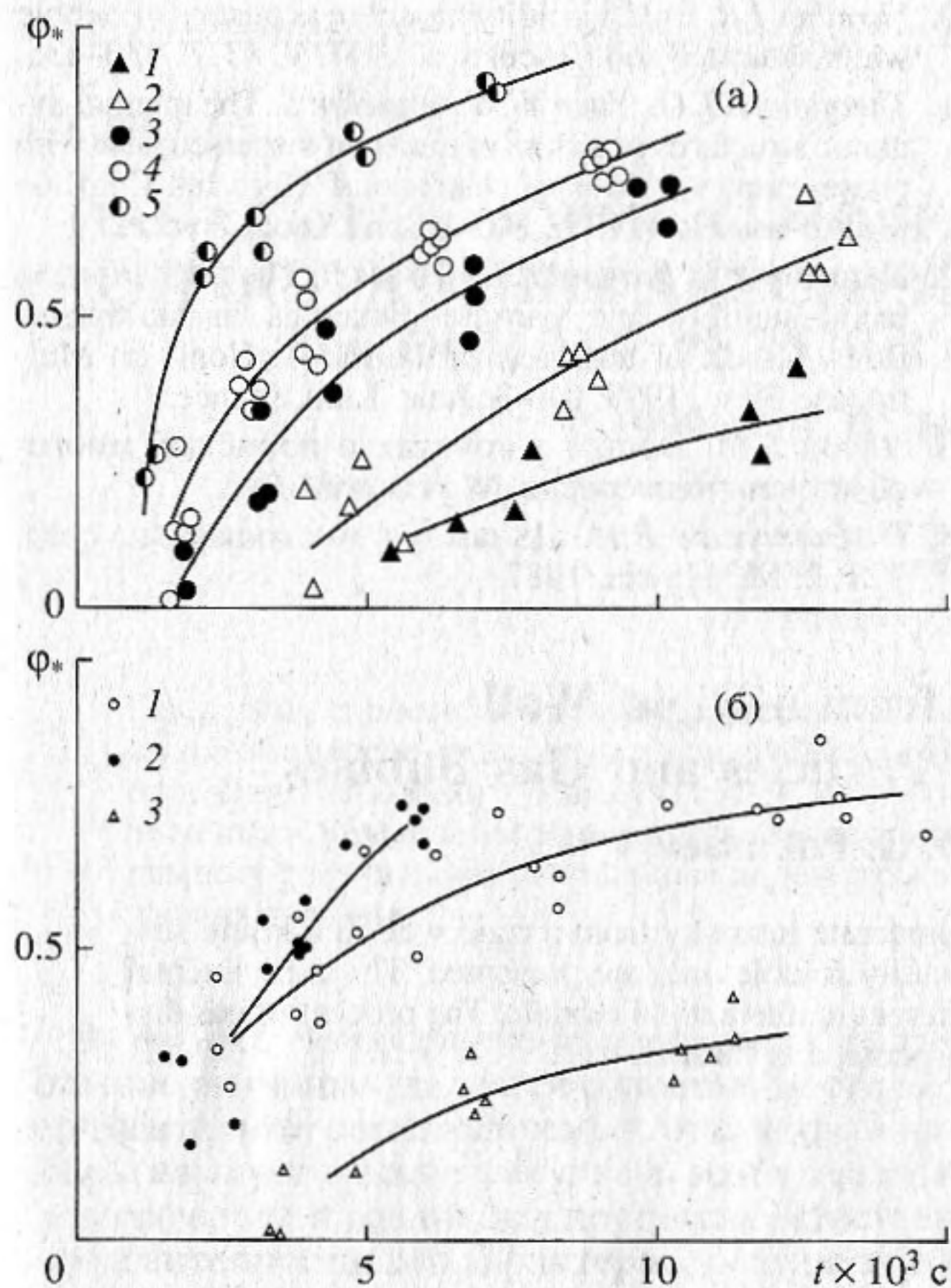
На рис. 6 точками представлены расчетные зависимости относительной величины растворенного в воде углекислого газа за падающей ударной волной в трехфазной суспензии от времени нахождения газовой фазы за фронтом волны для разных значений амплитуд волн  $P_1/P_0$  и начальных объемных газосодержаний  $\varphi_0$ . Сплошные линии являют-

ся осреднением расчетных значений для соответствующих параметров  $P_1/P_0$  и  $\varphi_0$ . Расчет проводился с использованием экспериментальных значений амплитуды и скоростей отраженной ударной волны, измеренных на отдельных участках ее распространения, и изотермической модели Нигматулина (7), (8), (13), (14).

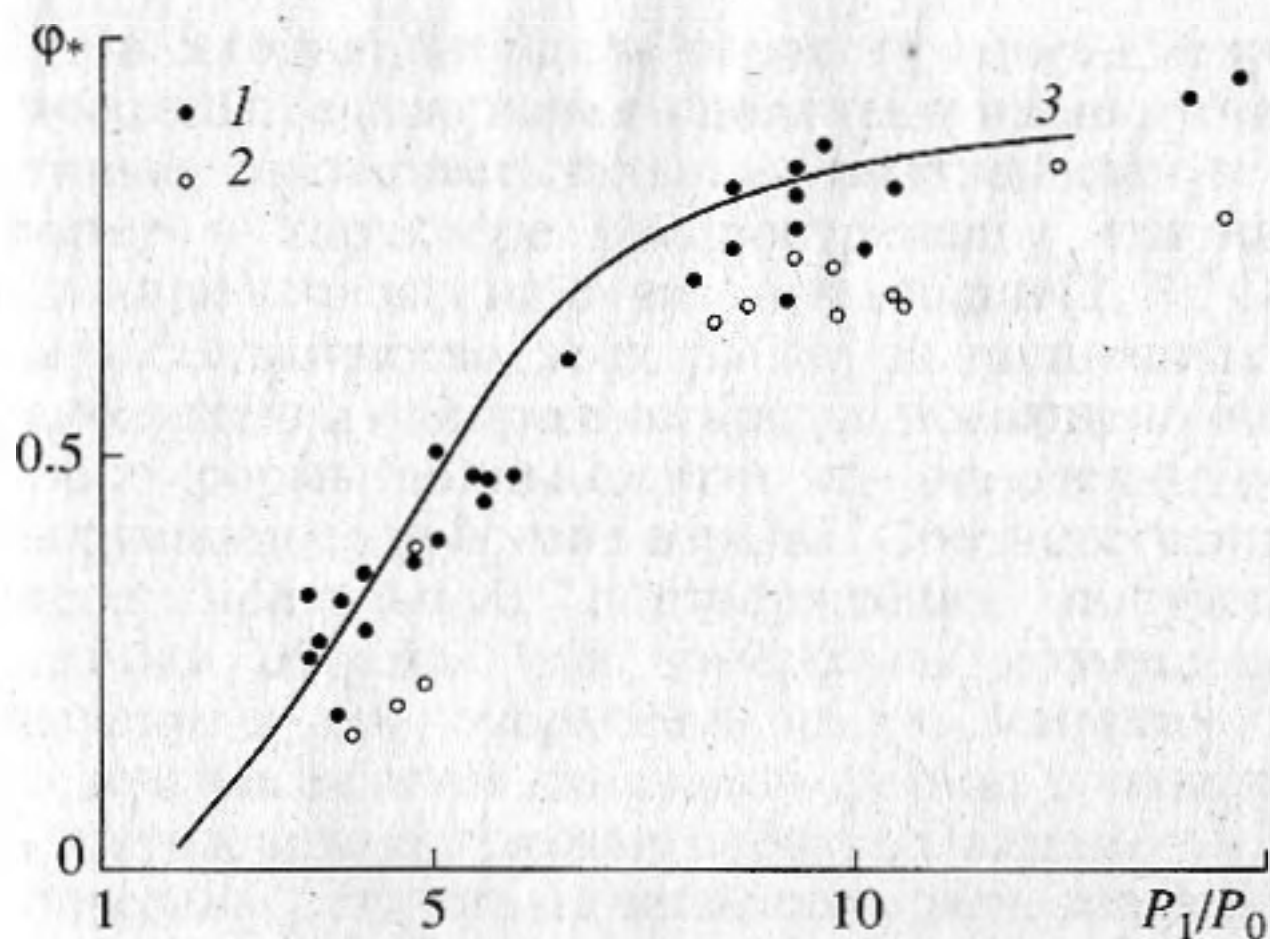
Несмотря на достаточно большой разброс расчетных точек, обусловленных большим разбросом параметров  $P_1/P_0$  и  $\varphi_0$  в каждой серии опытов, можно качественно судить о влиянии параметров волны и среды на процесс растворения газа за ударной волной. Приведенные зависимости показывают, что скорость растворения газа за волной уменьшается с увеличением времени нахождения газовой фазы за фронтом ударной волны и, по-видимому, имеет максимальное значение вблизи переднего фронта ударной волны. Из сравнения расчетных значений относительной величины растворенного газа при одинаковых параметрах амплитуд волн и разных  $\varphi_0$  (точки 1, 2 на рис. 6б и точки 4 на рис. 6а) видно, что  $\varphi_*$  зависит от начального объемного газосодержания. С увеличением  $\varphi_0$  процесс растворения газа за волной замедляется. В то же время относительная величина растворенного в жидкости газа за ударной волной в газожидкостных средах [7] не зависит от начального объемного газосодержания. Сравнивая  $\varphi_*$  для трехфазных и газожидкостных [7] сред, можно сделать вывод, что наличие твердой фазы приводит к замедлению процесса растворения газа за ударной волной. С увеличением начального объемного газосодержания влияние твердой фазы на процесс растворения становится более значительным, что можно объяснить следующим образом. На процесс растворения газа в жидкости существенно влияет интенсивное перемешивание жидкости около раздробившихся пузырьков. Чем интенсивнее перемешивание, тем лучше идет процесс растворения газа. Наличие твердой фазы уменьшает интенсивность перемешивания жидкости около раздробившихся пузырьков, что приводит к замедлению процесса растворения газа.

На рис. 7 представлены расчетные точки 1, 2 относительной величины растворенного в воде углекислого газа за падающей ударной волной в трехфазной суспензии  $\varphi_*$  от амплитуды волны для времени нахождения газовой фазы за ударной волной  $t = 10$  мс.

Из графика видно, что для амплитуд волн  $P_1/P_0 < 2$  растворением газа в жидкости можно пренебречь. При амплитуде волны  $P_1/P_0 \approx 5$  изменения объемного газосодержания за ударной волной вследствие изотермического сжатия и процесса растворения становятся сравнимыми. При  $P_1/P_0 \geq 10$  основным процессом, определяющим это газосодержание, является процесс растворения газа в жидкости за ударной волной. Линия 3



**Рис. 6.** Зависимость относительной величины растворенного в воде углекислого газа за ударной волной от времени нахождения газовой фазы за фронтом волны.  $m_0 = 0.59$ . а:  $\varphi_0 = 0.1-0.15$ , 1 -  $P_1/P_0 \approx 3.2$ , 2 -  $P_1/P_0 \approx 5.5$ , 3 -  $P_1/P_0 \approx 8.0$ , 4 -  $P_1/P_0 \approx 9.5$ , 5 -  $P_1/P_0 \approx 14.0$ ; б: 1 -  $\varphi_0 = 0.20-0.25$ ,  $P_1/P_0 \approx 9.5$ , 2 -  $\varphi_0 = 0.05$ ,  $P_1/P_0 \approx 9.5$ , 3 -  $\varphi_0 = 0.05$ ,  $P_1/P_0 \approx 3.2$ .



**Рис. 7.** Зависимость относительной величины растворенного в воде углекислого газа за ударной волной от амплитуды волны.  $m_0 = 5.9$ . 1 -  $\varphi_0 = 0.1-0.15$ , 2 -  $\varphi_0 = 0.20-0.25$ , 3 - обобщающая кривая для  $\varphi_*$  в воде с пузырьками углекислого газа.

представляет обобщающую кривую относительного объемного газосодержания за ударной волной при  $t = 10$  мс в воде с пузырьками углекислого газа [7]. Видно, что точки 1 ( $\varphi_0 = 0.1-0.15$ ) достаточно близко расположены от кривой 3. При больших значениях начального объемного газосодержания ( $\varphi_0 = 0.2-0.25$ ) точки 2 лежат ниже кривой 3. Следовательно с увеличением  $\varphi_0$  процесс растворения газа в жидкости за волной становится менее интенсивным.

Работа выполнена при финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (96-01-01458 и 96-02-16626) и Министерством науки и технологий Российской Федерации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально исследовано отражение ударных волн от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частицами и пузырьками инертного газа. Показано, что амплитуда отраженной ударной волны описывается адиабатическим приближением Ляхова, а ее скорость - изотермическим приближением Нигматулина.

2. Показано, что в трехфазной суспензии с пузырьками легкорастворимого газа происходит значительное усиление ударной волны при отражении от твердой стенки. Наличие в газожидкостной смеси твердой фазы достаточно большой концентрации не оказывает влияния на усиление ударных волн при отражении от твердой стенки.

3. Изучен процесс растворения газа за ударной волной в трехфазной суспензии. Показано, что наличие твердой фазы приводит к замедлению процесса растворения газа в жидкости за ударной волной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паркин Б.Р., Гилмор Ф.Р., Броуд Г.А. Ударные волны в среде с пузырьками воздуха // Сб. Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974.
2. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Тимофеев Е.И. Отражение плоских ударных волн от твердой стенки в системе пузырьки газа-жидкость // Изв. АН СССР. Мех. жидк. газ. 1978. № 2. С. 174-178.
3. Ostroumov G.A., Druzhinin G.A., Kriachko V.M., Tokman A.S. Acoustic waves propagation and nonlinear phenomena in porous media // Труды 6 Международного симпозиума по нелинейной акустике. М., 1976. Т. 1. С. 121-126.
4. Кедринский В.К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // ФГВ. 1980. № 5. С. 14-25.
5. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Нигматулин Р.И., Рахматулин Х.А., Тимофеев Е.И. Усиление ударных волн в жидкости с пузырьками пара и растворяющегося газа // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263. № 3. С. 594-598.
6. Донцов В.Е. Отражение волн давления умеренной интенсивности от твердой стенки в жидкости с пу-

- зырьками легкорастворимого газа // ПМТФ. 1998. № 5. С. 19–24.
7. *Dontson V.E.* Investigation of the gas dissolving process behind a shock wave in a liquid with readily soluble gas // *Russian J. Eng. Thermophys.* 1996. V. 6. № 4. P. 321–334.
  8. *Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G.* The propagation of pressure waves in liquid with solid particles and gas bubbles // *Russian J. Eng. Thermophysics.* 1994. V. 4. № 2. P. 173–188.
  9. *Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G.* Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *I.J. Multiphase Flow.* 1996. V. 22. № 3. P. 417–429.
  10. *Shreiber I.R.* Bulk viscosity model in acoustics of bubble water saturated soil // *Acustica.* 1997. V. 83. P. 430–435.
  11. *Theofanous T.G., Yuen W.W., Angelini S.* The internal dynamic structures of a class of transient dispersed flow with phase change // *Book of abstracts of Third Int. Conf. on Multiphase Flow.* 1998. 3.6–1. June. Lion, France.
  12. *Hanratty T.J., Iliopoulos I., Woods B.* The roles of interfacial stability and particle dynamics in multiphase flow // *Book of abstracts of Third Int. Conf. on Multiphase Flow.* 1998. 0.1–3. June. Lion, France.
  13. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982.
  14. *Нугматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987.

## Shock Wave Reflection from a Rigid Wall in a Liquid Suspension of Solid Particles and Gas Bubbles

V. E. Dontsov and B. G. Pokusaev

Experimental studies of the reflection of shock waves of moderate intensity from a rigid wall in a liquid suspension of solid particles and gas bubbles (inert gas and readily soluble one) are presented. The experimental data are compared to the theoretical ones obtained from different mathematical models. The process of gas dissolution observed behind a shock wave in a three-phase suspension is studied.