

## ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ УМЕРЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ЛЕГКОРАСТВОРИМОГО ГАЗА

В. Е. Донцов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

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 стенки.

В работах [1–3] теоретически и экспериментально исследовано отражение волн давления большой амплитуды от твердой границы в жидкости с пузырьками газа. Показано, что процесс отражения волн имеет существенно нелинейный характер. В [4, 5] на основе численных расчетов процесса схлопывания слоя кавитационных пузырьков у твердой стенки обнаружено возникновение на стенке серии импульсов давления большой амплитуды, обусловленной инерционными эффектами коллективного схлопывания пузырьков. В экспериментах [6–8] установлено, что в жидкости с паровыми пузырьками и в жидкости с пузырьками легкорастворимого газа имеют место эффекты усиления ударных волн как в прямой волне, так и при отражении от твердой границы.

Опыты проводились на установке типа «ударная труба» [9]. Рабочий участок представлял собой толстостенную стальную трубу с внутренним диаметром 0,053 м и длиной 2 м, ограниченную снизу твердой стенкой и заполненную жидкостью. В нижней части рабочего участка по его периметру через отверстия диаметром 0,2 мм в жидкость вводились газовые пузырьки. Такой способ ввода пузырьков позволил получить достаточно большие объемные газосодержания. Средний размер пузырьков для разных газосодержаний изменялся в пределах 2–4 мм, а разброс пузырьков по размерам не превышал 10–20 %. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, насыщенная углекислым газом до равновесного состояния при данных начальных условиях (комнатной температуре и атмосферном давлении). В качестве газовой фазы использовался углекислый газ. Среднее по длине рабочего участка газосодержание вычислялось по измерению поднятия столба жидкости в рабочем участке при введении в нее пузырьков газа. Размер пузырьков измерялся путем фотографирования через оптические окна в верхней и нижней части рабочего участка.

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 и обрабатывались на ЭВМ.

На рис. 1 показана зависимость скорости ударной волны  $U_1$  в воде с пузырьками углекислого газа от амплитуды  $P_1/P_0$ . Здесь  $C_0$  — низкочастотная скорость звука в газожидкостной смеси,  $P_0$  и  $P_1$  — давление перед ударной волной и за ее фронтом. Экспериментальные точки 1–4 соответствуют значениям начального объемного газосодержания в среде:  $\varphi = 0,05; 0,10; 0,18; 0,29$ . Расчеты по адиабатическому прибли-

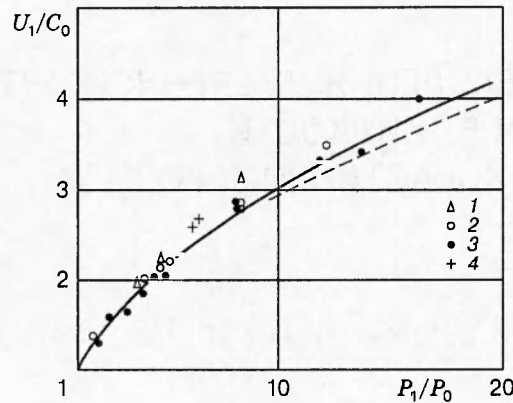


Рис. 1

жению  $U/C_0 = ((\gamma + 1)P_1/(2\gamma P_0) + (\gamma - 1)/2\gamma)^{0,5}$  [1] представлены сплошной линией;  $U/C_0 = ((P_1/P_0 - 1)/(\gamma(1 - (P_1/P_0)^{-1/\gamma})))^{0,5}$  [10] — штриховой;  $\gamma$  — показатель адиабаты; в расчетах растворение газа за волной не учитывалось.

Видно, что результаты расчетов достаточно близки друг к другу и хорошо описывают опытные данные. Расчет по изотермическому приближению ( $\gamma = 1$ ) лежит несколько выше этих кривых. Как будет показано далее, за фронтом ударной волны умеренной амплитуды идет интенсивный процесс растворения углекислого газа в воде. Следовательно, можно утверждать, что процесс растворения газа в жидкости за ударной волной в исследованном диапазоне параметров волн и среды практически не влияет на скорость ее переднего фронта. Как показали эксперименты, эффекты растворения газа не влияют и на структуру ударной волны, не приводят к изменению ее амплитуды и формы в исследованном диапазоне параметров волн и среды.

Однако волновая картина качественно меняется при отражении ударной волны от твердой стенки в жидкости с пузырьками легко растворимого газа. На рис. 2,а показана эволюция падающей ударной волны 1 и отраженной от твердой стенки волны 2 в воде с пузырьками углекислого газа ( $x$  — расстояние от входа волны в газожидкостную среду до точки измерения профиля волны). Видно, что при отражении ударной волны от твердой стенки происходит ее значительное усиление. Кроме того, отраженная ударная волна практически сохраняет свою ступенчатую форму до прихода волны разрежения 3, отраженной от свободной поверхности газожидкостной среды.

Зависимость амплитуды  $P_2/P_1$  ударной волны, отраженной от твердой стенки в воде с пузырьками углекислого газа, от амплитуды  $P_1/P_0$  падающей на стенку ударной волны показана на рис. 2,б (точки — опытные данные для разных значений начального объемного газосодержания в жидкости). Линиями 1–10 представлены результаты расчетов по разным моделям для значений объемного газосодержания:  $\varphi = 0,05$  — линии 1, 4, 7;  $\varphi = 0,10$  — линии 2, 5, 8;  $\varphi = 0,18$  — линии 3, 6, 9;  $\varphi = 0,29$  — линия 10. Линии 1–3 соответствуют расчету по адиабатической модели Ляхова [10], а 4–6 — по изотермической модели Нигматулина [11] с учетом сжимаемости жидкости, но без учета процесса растворения газа в жидкости за волной. Линии 7–10 — расчет отражения ударной волны конденсации (растворения) [11]. Предполагается, что в падающей на стенку ударной волне происходит полное растворение газа и отраженная ударная волна распространяется по чистой жидкости.

Начиная с амплитуд волн  $P_1/P_0 \approx 4$  наблюдается значительное усиление отраженных ударных волн по сравнению с расчетами (кривые 1–6), не учитывающими процесс

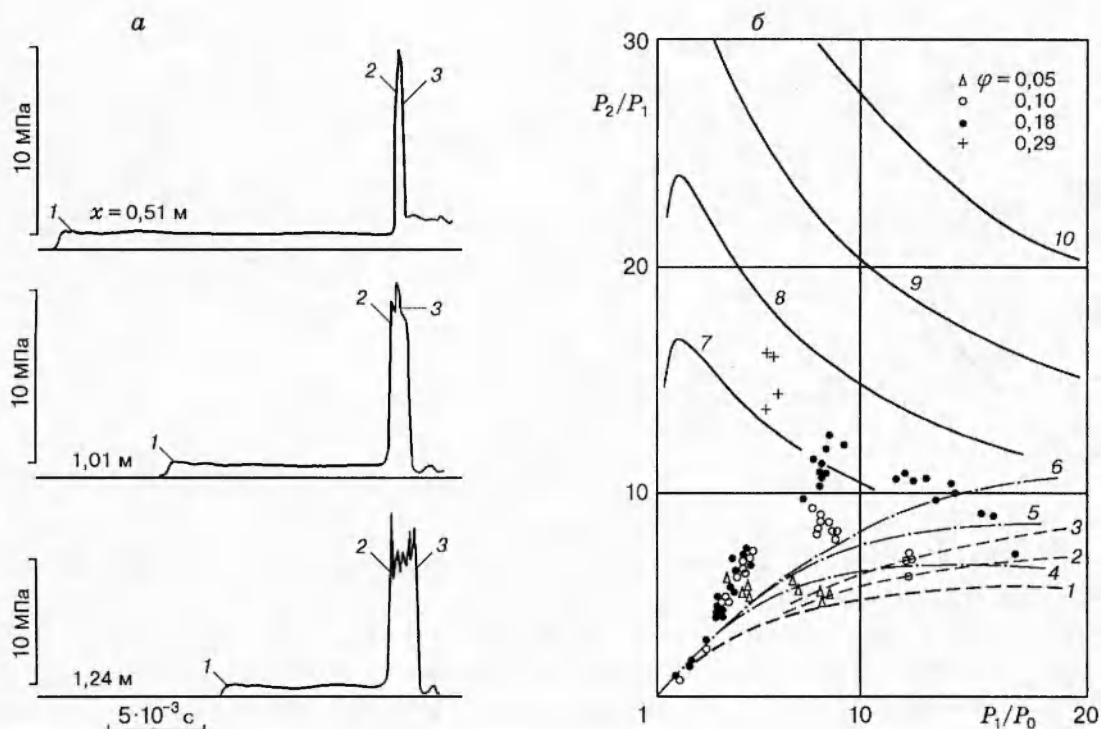


Рис. 2

растворения газа в жидкости за волной. С увеличением объемного газосодержания усиление отраженных волн становится более значительным, что согласуется с предложенным в [6, 7] механизмом усиления ударных волн в газопарожидкостных средах. Суть механизма усиления волн связана с переходом кинетической энергии радиального движения жидкости при схлопывании пузырьков в потенциальную энергию давления в жидкости [4, 7]. Для реализации этого механизма необходимо, чтобы растворение газа в пузырьках вследствие диффузионных процессов произошло на временах порядка длительности переднего фронта ударной волны. В противном случае не будет наблюдаться режим ускоряющегося схлопывания пузырьков, приводящий к появлению всплесков давления в жидкости [7]. Одним из факторов, ускоряющих межфазный массообмен, является увеличение межфазной поверхности, что может быть обусловлено дроблением пузырьков в волне. Из рис. 2, б видно, что порог по амплитуде  $P_1/P_0$  начала усиления волн при отражении ( $P_1/P_0 \approx 4$ ) соответствует порогу интенсивного дробления пузырьков размером 2–4 мм в ударных волнах [12]. Действительно, при давлениях больше пороговых дробление пузырьков за падающей на стенку ударной волной приводит к значительному увеличению межфазной поверхности. Следовательно, отраженная ударная волна распространяется по среде с достаточно сильно развитой межфазной поверхностью, и газ в пузырьках успевает раствориться за время прохождения фронта отраженной ударной волны. На последней стадии схлопывания пузырьков возникают мощные импульсы давления в жидкости, которые и приводят к усилению отраженной ударной волны.

Расчеты с учетом полной конденсации (растворения) в падающей ударной волне (кривые 7–10) дают лишь качественное соответствие с экспериментом. Это обусловлено тем, что в этих расчетах растворение газа происходит мгновенно за падающей на стенку ударной волной, что приводит к усилению волн с достаточно малой амплитудой  $P_1/P_0 \approx 1$ . В экспериментах «ударное» растворение, приводящее к сильному увеличению давления в среде, происходит лишь при наличии достаточно развитой межфазной поверхности, след-

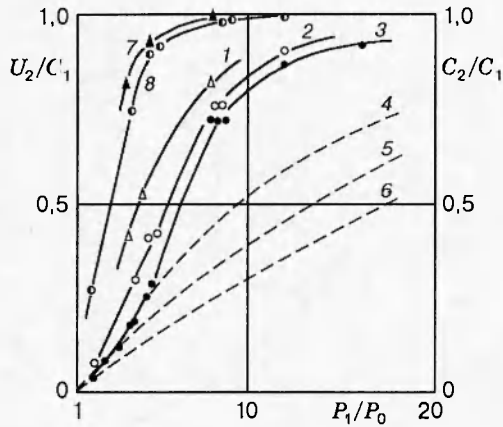


Рис. 3

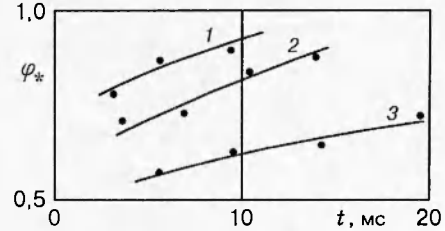


Рис. 4

ствие чего усиление в эксперименте начинается с амплитуд волн  $P_1/P_0 \approx 4$ .

Отметим, что режим усиления ударных волн при отражении от стенки наблюдается в достаточно узком диапазоне амплитуд волн  $P_1/P_0$ . С повышением  $P_1/P_0$  экспериментальные точки для первых трех значений  $\varphi$  выходят соответственно на расчетные кривые 1–3, выполненные по адиабатическому приближению Ляхова без учета процесса растворения. Это связано, по-видимому, с тем, что за падающей на стенку ударной волной с амплитудой  $P_1/P_0 \geq 10$  происходит значительное уменьшение объемного газосодержания (за счет как адиабатического сжатия газа в пузырьках, так и процесса растворения). Вследствие этого кинетическая энергия радиального движения жидкости при схлопывании газовых пузырьков в отраженной ударной волне существенно уменьшается и процесс «ударного» растворения слабо выражен.

Рассмотрим процесс растворения газа в жидкости за падающей на стенку ударной волной по данным измерения амплитуды и скорости отраженной волны. На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости скорости отраженной от твердой стенки ударной волны  $U_2$  (кривые 1–3) и отраженной от свободной поверхности газожидкости волны разрежения  $C_2$  (кривые 7, 8) от амплитуды падающей на стенку ударной волны ( $C_1$  — скорость звука в жидкости). Линии 1, 7 соответствуют начальному объемному газосодержанию  $\varphi = 0,05$ ; 2, 8 —  $\varphi = 0,10$ ; 3 —  $\varphi = 0,18$ . Линиями 4–6 приведены результаты расчетов, выполненных по адиабатическому приближению Ляхова [10] без учета процесса растворения газа в жидкости для разных значений объемных газосодержаний ( $\varphi = 0,05$ ; 0,10; 0,18).

Видно, что для амплитуд волн  $P_1/P_0 \geq 2$  экспериментальные значения скорости отраженной от твердой стенки ударной волны (кривые 1–3) значительно отклоняются от соответствующих расчетных кривых 4–6. Следовательно, за падающей на стенку ударной волной с амплитудой  $P_1/P_0 \geq 2$  идет процесс растворения газа в жидкости, который приводит к значительному уменьшению объемного газосодержания за волной, а значит, и к увеличению скорости отраженной ударной волны.

Таким образом, если в расчетную формулу для скорости отраженной ударной волны [10] подставить экспериментальные значения амплитуды и скорости отраженной ударной волны при данном начальном  $\varphi$ , то можно вычислить объемное газосодержание за падающей ударной волной с учетом процесса растворения газа в жидкости  $\varphi_1^*$ . Соответственно можно вычислить относительную величину растворенного газа за ударной волной:  $\varphi_* = (\varphi_1 - \varphi_1^*)/\varphi_1$ , где  $\varphi_1$  — расчетное значение объемного газосодержания за ударной волной без учета процесса растворения.

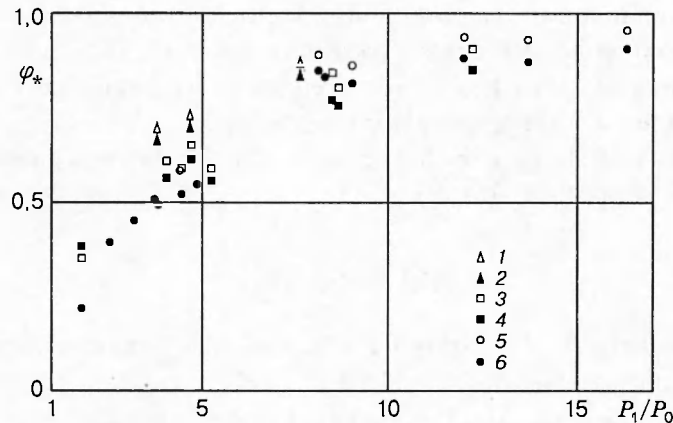


Рис. 5

На рис. 4 представлены расчетные зависимости относительной величины растворенного в воде углекислого газа за падающей ударной волной от времени нахождения газовой фазы за падающей ударной волной (время растворения) при начальном объемном газосодержании  $\varphi = 0,1$  и для  $P_1/P_0 = 12,2; 8,5; 4,8$  (кривые 1–3). Расчет проводился с использованием скоростей отраженной ударной волны, измеренных на отдельных участках ее распространения, и расчетной зависимости для скорости отраженной от твердой стенки ударной волны по адиабатической модели Ляхова [10].

Приведенные зависимости показывают, что скорость растворения газа за волной уменьшается со временем растворения и, по-видимому, имеет максимальное значение в начальный момент растворения пузырьков. Слабое изменение  $\varphi_*$  на поздней стадии растворения пузырьков позволяет получить оценочные зависимости  $\varphi_*$  от параметров волн и среды на временах  $t \approx 10$  мс.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости относительной величины растворенного в воде углекислого газа за падающей ударной волной  $\varphi_*$  от  $P_1/P_0$ . Точки 1, 2 соответствуют объемному газосодержанию перед волной  $\varphi = 0,05$ ; 3, 4 —  $\varphi = 0,10$ ; 5, 6 —  $\varphi = 0,18$ . Значения в точках 1, 3, 5 вычислены по измеренным скоростям отраженных ударных волн на отрезке измерения порядка 0,5 м на входе в газожидкостную смесь; в точках 2, 4, 6 — на отрезке измерения порядка 1 м. Вследствие этого, а также зависимости скорости отраженной ударной волны от  $P_2/P_1$  и объемного газосодержания  $\varphi_1^*$  времени нахождения газовых пузырьков за падающей ударной волной (времена растворения) для всех точек отличаются друг от друга. Интервал изменения времен растворения для данных экспериментов находится в пределах 6–15 мс. Но, несмотря на достаточно приближенное представление, полученная зависимость позволяет судить о процессе растворения газа за ударной волной. Видно, что за время  $t \approx 10$  мс для амплитуд волн  $P_1/P_0 \approx 5$  изменения объемного газосодержания за ударной волной вследствие адиабатического сжатия и процесса растворения становятся сравнимыми, а при  $P_1/P_0 \geq 10$  основным процессом, определяющим газосодержание за волной, является процесс растворения газа в жидкости.

При вычислении  $\varphi_*$  (рис. 4 и 5) использовалась адиабатическая модель Ляхова [10]. Предполагалось, что процесс растворения за отраженной волной не оказывает существенного влияния на ее скорость. А это может не выполняться для волн большой амплитуды. Из рис. 3 видно, что при  $P_1/P_0 \geq 10$  скорость волны разрежения, отраженной от свободной границы газожидкостной смеси, практически равна скорости звука в жидкости. Значит, отраженная от твердой стенки ударная волна есть волна полной конденсации (растворения) и для вычисления  $\varphi_*$  необходимо пользоваться моделью полной конденсации в ударной

волне [11]. Но отличие значений  $\varphi_*$ , полученных с использованием модели полной конденсации и адиабатической модели Ляхова, составляет менее 10% для амплитуд  $P_1/P_0 \geq 5$  и менее 2% для  $P_1/P_0 \geq 10$ . Это позволяет пользоваться моделью Ляхова с определенной степенью точности во всем интервале амплитуд волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01458).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Паркин Б. Р., Гилмор Ф. Р., Броуд Г. А. Ударные волны в среде с пузырьками воздуха // 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. Механика жидкости и газа. 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 // Тр. 6-го Междунар. симп. по нелинейной акустике. Ч. 1. М., 1976. С. 121–126.
4. Кедринский В. К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–34.
5. Кедринский В. К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // Физика горения и взрыва. 1980. № 5. С. 14–25.
6. Гельфанд Б. Е., Степанов В. В., Тимофеев Е. И., Цыганов С. А. Усиление ударных волн в неравновесной системе жидкость — пузырьки растворяющегося газа // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239, № 1. С. 71–73.
7. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Нигматулин Р. И. и др. Усиление ударных волн в жидкости с пузырьками пара и растворяющегося газа // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263, № 3. С. 594–598.
8. Покусаев Б. Г., Прибатурин Н. А., Вассерман Е. С. Эффекты возрастания амплитуды ударных волн умеренной интенсивности в парожидкостной среде. Особенности для снарядного течения // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1991. Вып. 100. С. 176–185.
9. Донцов В. Е., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волны давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 32–40.
10. Ляхов Г. М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982.
11. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 2. М.: Наука, 1987.
12. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. и др. Исследование разрушения пузырьков газа в жидкости ударными волнами // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 4. С. 51–56.

Поступила в редакцию 1/IX 1996 г.,  
в окончательном варианте — 27/I 1997 г.