

УДК 532.529

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СФЕРИЧЕСКИМ ГАЗОЖИДКОСТНЫМ КЛАСТЕРОМ

В. Е. Донцов

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

Экспериментально исследовано взаимодействие плоской ударной волны со сферическим газожидкостным кластером (поролонным шариком, насыщенным жидкостью с пузырьками газа) в вертикальной ударной трубе, заполненной жидкостью. Показано, что кластер генерирует уединенную волну давления большой амплитуды.

Ключевые слова: ударная волна, пузырьковый кластер, жидкость.

В [1] на основе численных расчетов процесса захлопывания слоя кавитационных пузырьков вблизи твердой стенки обнаружено возникновение на стенке серии импульсов давления большой амплитуды, обусловленных инерционными эффектами коллективного схлопывания пузырьков. В экспериментах [2, 3] при использовании оптических методов визуально зафиксирована мощная вторичная ударная волна, возникающая при захлопывании одиночного пузырька в жидкости. В [4–8] экспериментально установлено, что в жидкости с пузырьками пара и пузырьками легкорастворимого газа наблюдается усиление ударных волн. Усиление может происходить как в проходящей волне, так и в волне, отраженной от твердой границы. Генерация импульсов давления большой мощности сферическими пузырьковыми кластерами численно исследовалась в работе [9], где впервые предложена постановка задачи и объяснен механизм усиления ударных волн сферическим пузырьковым кластером.

В данной работе экспериментально изучено взаимодействие плоской ударной волны со сферическим пузырьковым кластером в жидкости.

Опыты проводились на установке типа ударной трубы. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу внутренним диаметром 53 мм и длиной 1 м. На оси вдоль рабочего участка располагалась проволока из нержавеющей стали диаметром 1 мм, концы которой закреплялись на торцевых стенках рабочего участка. Рабочий участок частично заполнялся жидкостью под вакуумом, что позволяло избежать появления пузырьков газа в жидкости. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. В рабочем участке вода насыщалась воздухом до равновесного состояния при комнатной температуре и атмосферном давлении. На проволоку в центре трубы надевался пузырьковый кластер — поролонный шарик, заполненный жидкостью с пузырьками газа. Кластер размещался вблизи дна рабочего участка (рис. 1). Верхний край кластера находился на расстоянии 10 мм от поверхности жидкости. В опытах использовались поролонные шарики диаметром 30 и 45 мм, а также поролонная пластина диаметром 53 мм и высотой 20 мм.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-01-00211) в рамках программы “Ведущие научные школы” (грант № НШ-523.2003.1) и Интеграционного проекта № 22 (2003 г.) СО РАН.

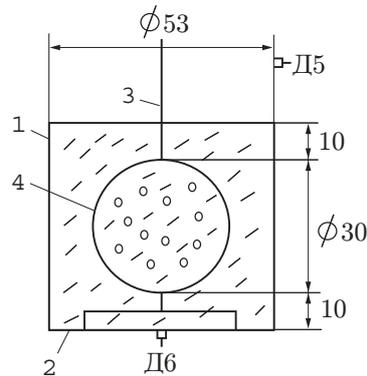


Рис. 1. Схема расположения пузырькового кластера в ударной трубе:  
 1 — рабочий участок; 2 — дно рабочего участка; 3 — стальная проволока; 4 — газожидкостный кластер; Д5, Д6 — датчики давления

Пузырьковый кластер готовился на вспомогательной установке следующим образом. Поролоновый шарик помещался в рабочий объем этой установки и насыщался дистиллированной водой под вакуумом. Далее через жидкость в рабочем объеме прокачивались воздушные пузырьки при повышенном (по сравнению с атмосферным) статическом давлении. Жидкость в рабочем объеме насыщалась воздухом до равновесного состояния при данном статическом давлении, и вследствие диффузии газ растворялся внутри поролонового шарика. Время выравнивания концентрации растворенного в жидкости газа на поверхности и в центре шарика  $\tau$  составляло несколько десятков часов ( $\tau \approx R^2/(2D)$  [10], где  $R$  — радиус кластера;  $D$  — коэффициент диффузии). После сброса статического давления до атмосферного происходило выделение из жидкости газовых пузырьков, которые прилипали к поролоновому скелету и формировали газожидкостный кластер.

Отметим, что пористость поролонового шарика достаточно велика (около 98 %), а жесткость мала, поэтому пористый скелет не оказывал влияния на распространение волны давления [11].

Считая процесс образования зародышей газовых пузырьков в кластере при сбросе статического давления гетерогенным, что справедливо для обычной дистиллированной воды, можно оценить критический радиус зародыша, с которого начинается его рост [12]:  $a_* = 2\sigma/\Delta p_s$  ( $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\Delta p_s$  — перепад статического давления). При приготовлении кластера, насыщенного водой с пузырьками воздуха, давление  $\Delta p_s \geq 0,2$  МПа. Размер критического зародыша  $a_* \leq 10^{-6}$  м. Учитывая, что число зародышей с характерным размером  $a \approx 10^{-6}$  м в единице объема воды составляет  $n \approx 10^{12}$  м<sup>-3</sup> [12], можно оценить радиус пузырька, до которого вырастет зародыш при сбросе статического давления. В исследованном диапазоне значений объемного газосодержания диаметр воздушных пузырьков обычно составляет  $d \approx 10^{-4}$  м. Однако на поверхности кластера наблюдались пузырьки газа размером вплоть до  $d \approx 5 \cdot 10^{-4}$  м, что может быть обусловлено слиянием пузырьков в процессе их роста после сброса статического давления.

Варьируя  $\Delta p_s$ , можно изменять начальное объемное газосодержание в кластере  $\varphi$ . Значение среднего объемного газосодержания в кластере определялось по увеличению объема жидкости при уменьшении начального статического давления в среде и по объему кластера [11]. Погрешность измерения начального объемного газосодержания не превышала 10 %.

Волны давления ступенчатой формы образовывались в воздухе при разрыве диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления и рабочий участок, и далее распространя-

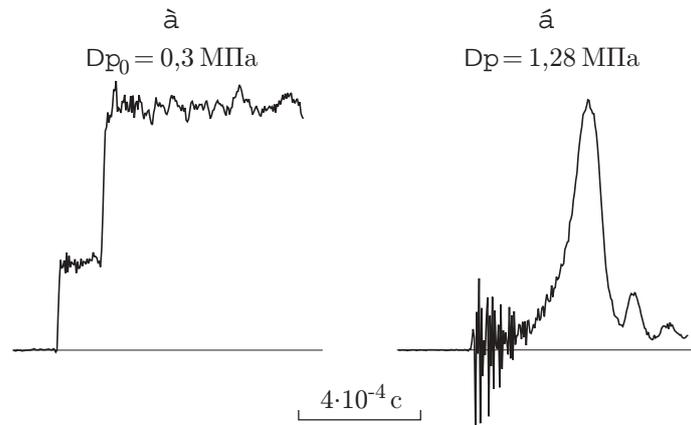


Рис. 2. Профиль воздушной ударной волны, входящей в жидкость (а), и профиль уединенной волны давления в жидкости (б)

лись в жидкость. Профили волн давления регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными на боковой поверхности (Д1–Д5) и на дне рабочего участка (Д6). Сигналы с датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывались на компьютере.

На рис. 2,а приведены профили воздушной ударной волны, входящей в жидкость ( $\Delta p_0$ ), на рис. 2,б — волны давления в жидкости ( $\Delta p$ ). Видно, что газожидкостный кластер, сжимаясь под действием входящей в жидкость волны давления ступенчатой формы, формирует солитоноподобный профиль давления в жидкости. Амплитуда волны давления в жидкости значительно превышает амплитуду входящей в среду волны. Формирование уединенного профиля связано с поглощением кластером преломленной ударной волны и последующим переизлучением [9]. Высокочастотные осцилляции на переднем фронте волны (рис. 2,б) связаны с прохождением по жидкости высокочастотных пульсаций ударной волны и их отражением от дна и свободной поверхности жидкости, а также с колебаниями пузырьков в кластере.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды волны давления в жидкости  $\Delta p$  (точки 1) от амплитуды входящей в жидкость ударной волны  $\Delta p_0$  для геометрии расположения кластера, представленной на рис. 1 ( $p_0$  — статическое давление в жидкости перед волной). Видно, что амплитуда переизлученной кластером волны давления значительно превышает амплитуду входящей в среду ударной волны и растет с увеличением  $\Delta p_0/p_0$ . Существенный разброс значений  $\Delta p/\Delta p_0$  при больших значениях  $\Delta p_0/p_0$  связан с уменьшением начального объемного газосодержания в кластере  $\varphi$  в процессе проведения эксперимента вследствие выхода части пузырьков из кластера после прохождения по среде волны давления большой амплитуды. После уменьшения  $\varphi$  более чем на 20 % заданного начального значения эксперимент прекращался и готовился новый кластер с заданными параметрами. Точками 2 на рис. 3 представлены опытные данные для полуширины уединенной волны в жидкости, которая измерялась так же, как в случае классического солитона Кортевега — де Вриза или Буссинеска [13] ( $\Delta t$  — длительность волны от значения  $0,42\Delta p$  до максимального значения давления в волне  $\Delta p$ ). Полученные длительности волн для соответствующих амплитуд значительно больше длительности солитонов, рассчитанных по размеру пузырьков в кластере [13, 14], и значительно меньше длительности волны, генерируемой колебаниями газового пузырька размером с кластер. При малых амплитудах падающей ударной волны наблюдается сильная зависимость длительности уединенной волны от амплитуды. С увеличением значений  $\Delta p_0/p_0$  длительность уединенной волны изменяется значительно меньше.

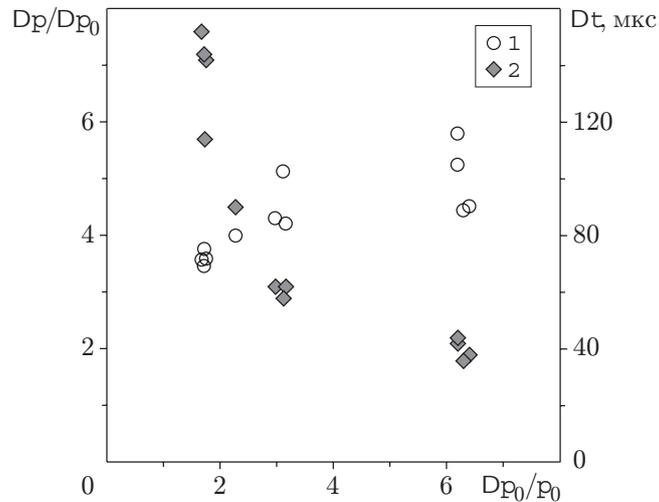


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды уединенной волны давления в жидкости (1) и ее полуширины (2) от амплитуды входящей в жидкость ударной волны ( $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 12,8$  %)

Рассмотрим далее результаты исследований взаимодействия ударной волны ступенчатой формы со сферическим газожидкостным кластером вблизи поверхности жидкости и формирования бегущей по жидкости уединенной волны давления. Верхний край кластера находился на расстоянии 10 мм от поверхности жидкости, а уровень жидкости в рабочем участке составлял примерно 0,5 м. На рис. 4 показаны профили волн давления в жидкости за пузырьковым кластером диаметром 30 мм на различных расстояниях  $x$  от входа ударной волны в среду для двух значений начальной амплитуды волны. Профили волн, приведенные на рис. 4, *а, б*, получены в течение одного эксперимента. Датчик, установленный на расстоянии  $x = 0,495$  м от входа волны в среду, был на одном уровне с дном рабочего участка и регистрировал отраженную от дна волну. На рис. 4, *а* видно, что из начальной волны ступенчатого профиля пузырьковый кластер формирует уединенную волну давления, которая, распространяясь по жидкости со скоростью звука в жидкости, практически не меняет своей формы и амплитуды ( $x = 0,105; 0,305$  м). Амплитуда уединенной волны давления значительно превышает амплитуду падающей ударной волны. При отражении от жесткого дна амплитуда уединенной волны увеличивается почти в два раза ( $x = 0,495$  м). Высокочастотные осцилляции на переднем фронте уединенной волны обусловлены в основном колебаниями газовых пузырьков в кластере. С увеличением амплитуды входящей в среду ударной волны длительность формирующейся уединенной волны уменьшается, а ее амплитуда увеличивается (рис. 4, *б*). Профиль уединенной волны давления, как и для солитонов большой амплитуды в гомогенной газожидкостной среде [14], становится более острым. Увеличение амплитуды уединенной волны приводит к увеличению интенсивности ее затухания в жидкости.

Экспериментальные зависимости амплитуды уединенной волны давления, сформированной пузырьковым кластером, от амплитуды входящей в среду ударной волны для различных параметров газожидкостного кластера диаметром 30 мм показаны на рис. 5 (точки 1–4 — данные для амплитуды сформированной кластером уединенной волны, точки 5, 6 — данные для амплитуды отраженной от жесткого дна уединенной волны). Амплитуда уединенной волны, сформированной пузырьковым кластером, измерялась на расстоянии 105 мм от входа ударной волны в среду. Из анализа представленных зависимостей можно сделать вывод, что при малых значениях  $\Delta p_0/p_0$  амплитуда уединенной волны

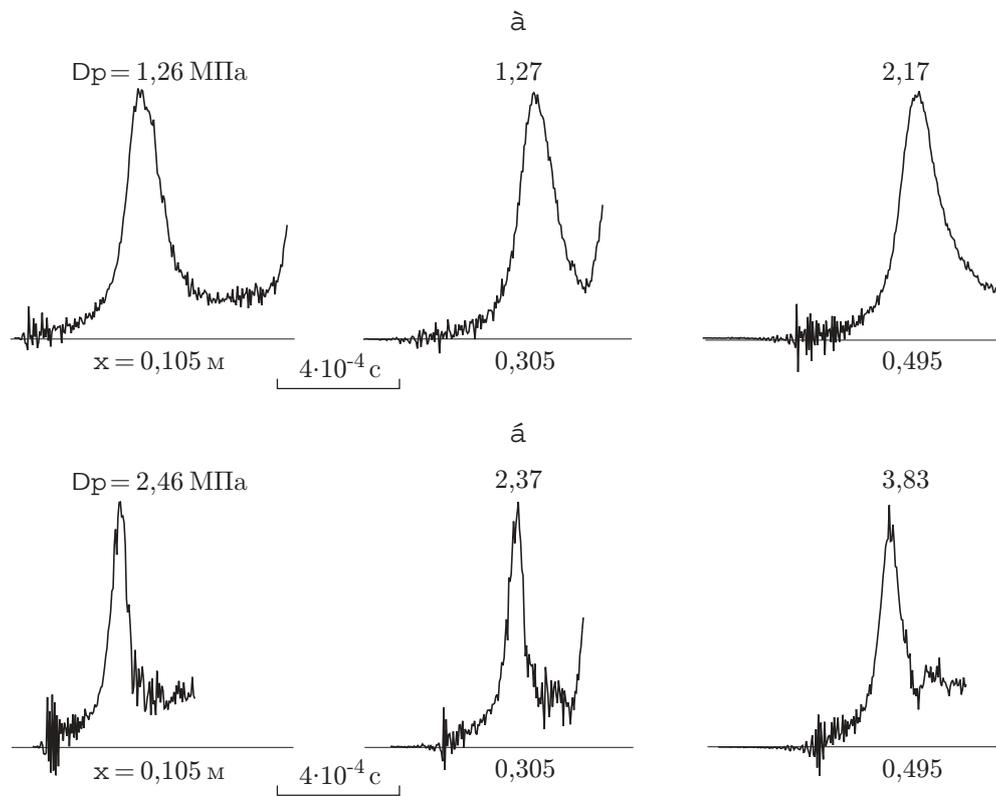


Рис. 4. Профили волн давления в жидкости за пузырьковым кластером диаметром 30 мм ( $p_0 = 0,1$  МПа):

*a* —  $\varphi = 12$  %,  $\Delta p_0 = 0,36$  МПа; *б* —  $\varphi = 8,9$  %,  $\Delta p_0 = 0,69$  МПа

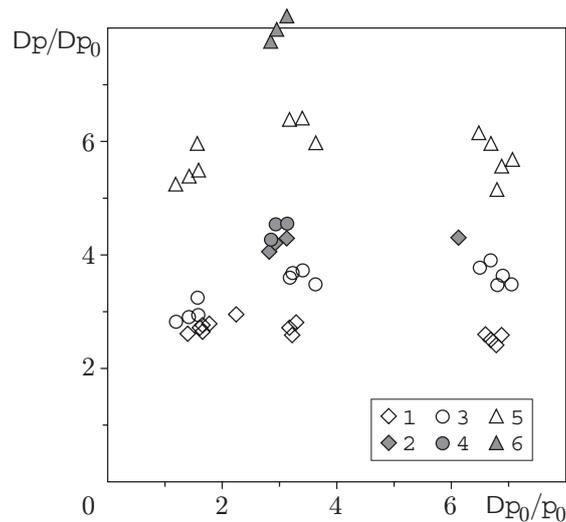


Рис. 5. Зависимости относительной амплитуды уединенной волны давления, сформированной пузырьковым кластером диаметром 30 мм, от амплитуды входящей в среду ударной волны:

1 —  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 4,8$  %; 2 —  $p_0 = 0,05$  МПа,  $\varphi = 11,2$  %; 3 —  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 12$  %; 4 —  $p_0 = 0,05$  МПа,  $\varphi = 24$  %; 5 —  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 12$  %; 6 —  $p_0 = 0,05$  МПа,  $\varphi = 24$  %

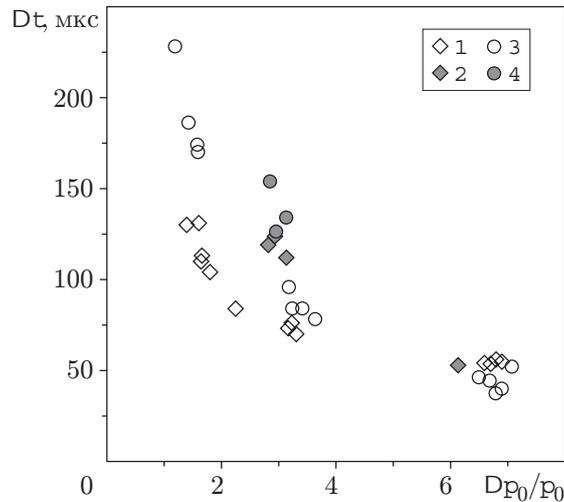


Рис. 6. Зависимость полуширины уединенной волны давления в жидкости от амплитуды ударной волны, входящей в среду:

1 —  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 4,8$  %; 2 —  $p_0 = 0,05$  МПа,  $\varphi = 11,2$  %; 3 —  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\varphi = 12$  %; 4 —  $p_0 = 0,05$  МПа,  $\varphi = 24$  %

растет, а при больших относительная амплитуда  $\Delta p/\Delta p_0$  уменьшается с увеличением амплитуды входящей в среду ударной волны. По-видимому, в области  $\Delta p_0/p_0 \approx 5 \div 10$  находится максимум относительных амплитуд  $\Delta p/\Delta p_0$ , что согласуется с результатами численных расчетов работы [9]. Из сравнения опытных данных (точки 1, 3) для разных начальных объемных газосодержаний  $\varphi$  следует, что увеличение  $\varphi$  в кластере приводит к увеличению амплитуды уединенной волны. Уменьшение начального статического давления в кластере перед волной также приводит к увеличению амплитуды уединенной волны (ср. точки 3, 2). Уменьшение  $p_0$  и увеличение  $\varphi$  в кластере увеличивает сжимаемость кластера, что приводит к более интенсивному сжатию кластера в ударной волне и увеличению амплитуды уединенной волны. При отражении от твердой стенки амплитуды уединенных волн увеличиваются почти в два раза (точки 3 и 5, 4 и 6 соответственно). Наибольшее отклонение от этой закономерности наблюдается при больших амплитудах волн (точки 3, 5), что обусловлено диссипативными потерями при эволюции волны в жидкости.

На рис. 6 представлены опытные данные для полуширины уединенной волны в жидкости в зависимости от амплитуды ударной волны, входящей в среду, для различных параметров газожидкостного кластера диаметром 30 мм. Видно, что с увеличением амплитуды  $\Delta p_0/p_0$  длительность уединенной волны уменьшается. При малых значениях амплитуды ударной волны наблюдается сильная зависимость  $\Delta t$  от начального объемного газосодержания  $\varphi$  и статического давления перед волной  $p_0$ . С ростом  $\varphi$  (точки 1, 3) и уменьшением  $p_0$  (точки 3, 2) длительность уединенной волны увеличивается. Это обусловлено тем, что при малых значениях  $\Delta p_0/p_0$  время сжатия кластера и длительность сформированной им уединенной волны определяются в основном временем прохождения преломленной ударной волны через кластер. С увеличением амплитуды  $\Delta p_0/p_0$  все большую роль в сжатии кластера начинают играть инерционные свойства кластера. При  $\Delta p_0/p_0 > 6$  длительность уединенной волны практически не зависит от параметров кластера  $\varphi$ ,  $p_0$ , а определяется амплитудой волны, так же как в случае солитонов в пузырьковых средах [13, 14].

На рис. 7,а показаны профили волн давления в жидкости за пузырьковым кластером диаметром 45 мм на расстоянии  $x = 0,105$  м от входа ударной волны в среду и вблизи дна рабочего участка ( $x = 0,495$  м). Видно, что увеличение кластера до размера, близкого

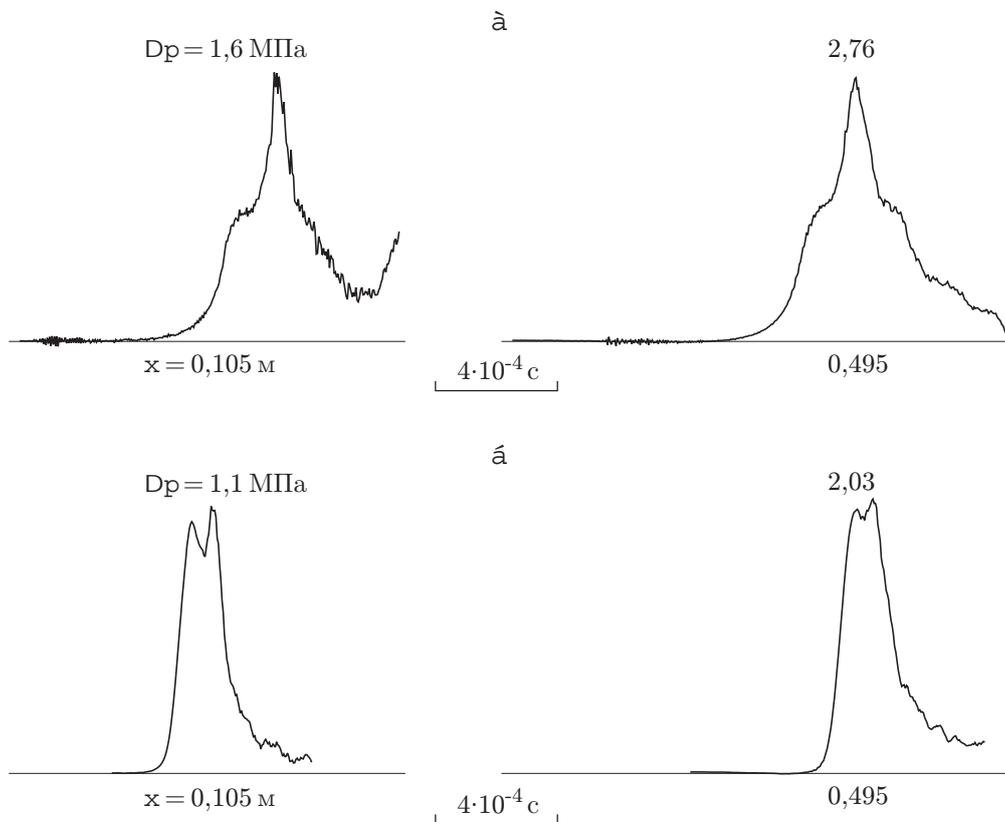


Рис. 7. Профили волн давления в жидкости ( $p_0 = 0,1$  МПа,  $\Delta p_0 = 0,3$  МПа):  
 а — за сферическим кластером диаметром 45 мм ( $\varphi = 9,2$  %); б — за плоским слоем  
 ( $\varphi = 8,8$  %)

к внутреннему диаметру рабочего участка установки, приводит к изменению структуры уединенной волны, сформированной кластером. Длительность уединенной волны с ростом размера кластера увеличивается, при этом фронт волны имеет ярко выраженную точку перегиба. Таким образом, на определенной стадии процесса сжатия кластера ударной волной давление за кластером практически перестает расти в достаточно длительном промежутке времени, затем вновь резко возрастает. Аналогичная картина наблюдается и на заднем фронте уединенной волны в процессе растяжения кластера. Такая структура волны может быть обусловлена влиянием твердой стенки на колебания кластера. При сжатии кластера приток жидкости в кластер с боковой поверхности рабочего участка ограничен стенкой. Следовательно, происходит переток жидкости вдоль поверхности кластера от центра рабочего участка к боковой поверхности, и процесс сжатия кластера замедляется.

На рис. 7,б приведены профили волн давления в жидкости за плоским поролюновым газожидкостным слоем диаметром, равным диаметру рабочего участка, и высотой 20 мм. Как и в случае сферического кластера, наблюдается усиление волны при прохождении через газожидкостный слой. Однако амплитуда волны определяется законом отражения на границах газожидкостного слоя, а длительность — временем пробега волны сжатия и разрежения по слою.

Экспериментальная зависимость амплитуды уединенной волны давления, сформированной пузырьковым кластером диаметром 45 мм, от амплитуды входящей в среду ударной волны показана на рис. 8 (точки 1). На этом же рисунке представлены данные для амплитуды отраженной от жесткого дна уединенной волны давления (точки 2). Видно,

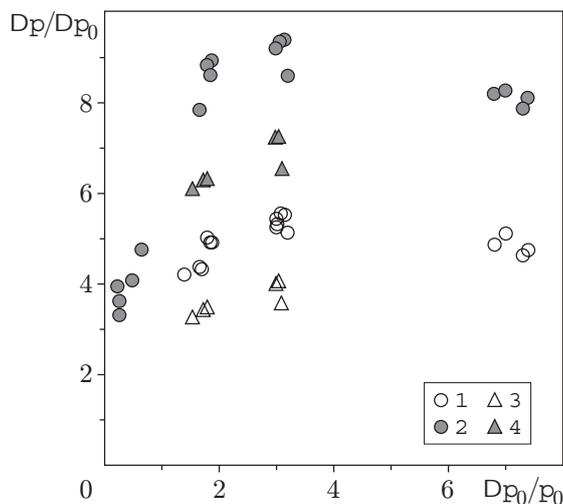


Рис. 8. Относительная амплитуда уединенной волны давления в жидкости ( $p_0 = 0,1$  МПа):

1, 2 — за сферическим кластером диаметром 45 мм ( $\varphi = 9,2$  %); 3, 4 — за плоским слоем ( $\varphi = 8,8$  %); 1, 3 — амплитуда проходящей волны; 2, 4 — амплитуда отраженной от дна волны

что характер зависимостей с увеличением размера кластера не изменяется. Из сравнения опытных данных, приведенных на рис. 8 (точки 1, 2) и на рис. 5 (точки 3, 5) для близких значений начального объемного газосодержания и статического давления перед волной, следует, что увеличение размера кластера приводит к увеличению амплитуды сформированной им уединенной волны давления.

Для сравнения на рис. 8 приведены опытные данные для волны в жидкости за плоским поролюновым слоем диаметром, равным диаметру рабочего участка, и высотой 20 мм (точки 3 — сформированная слоем волна, 4 — волна, отраженная от жесткого дна). Видно, что, так же как в случае сферического кластера, наблюдается увеличение амплитуды волны. Однако амплитуда волны за плоским слоем меньше, чем за сферическим кластером примерно того же объема (точки 1, 3).

Таким образом, показано, что взаимодействие плоской ударной волны со сферическим пузырьковым кластером в жидкости приводит к генерации уединенной волны давления с амплитудой, значительно превышающей амплитуду ударной волны. Установлено, что структура уединенной волны давления определяется не только параметрами кластера и амплитудой ударной волны, но и отношением диаметров кластера и рабочего участка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кедринский В. К.** Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–34.
2. **Lauterborn W., Vogel A.** Modern optical techniques in fluid mechanics // Annu. Rev. Fluid Mech. 1984. V. 16. P. 223–244.
3. **Tomita Y., Shima A.** High-speed photographic observations of laser-induced cavitation bubbles in water // Acustica. 1990. V. 71. P. 161–171.
4. **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.

5. **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.
6. **Накоряков В. Е., Вассерман Е. С., Покусаев Б. Г., Прибатурин Н. А.** Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32, № 3. С. 411–417.
7. **Terper W.** Experimental investigation of the propagation of shock waves in bubbly liquid-vapour mixtures // Proc. of the 14th Intern. symp. on shock tubes and shock waves, Sydney, Australia, Aug. 19–22, 1983. Sydney: New South Wales Univ. Press, 1983. P. 397–404.
8. **Донцов В. Е.** Отражение волн давления умеренной интенсивности от твердой стенки в жидкости с пузырьками легкорастворимого газа // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 5. С. 19–24.
9. **Кедринский В. К., Шокин Ю. И., Вшивков В. А. и др.** Генерация ударных волн в жидкости сферическими пузырьковыми кластерами // Докл. РАН. 2001. Т. 381, № 6. С. 773–776.
10. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1952.
11. **Dontsov V. E., Nakoryakov V. E.** Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with liquid having soluble-gas bubbles // Intern. J. Multiphase Flow. 2001. V. 27, N 12. P. 2023–2041.
12. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1, 2.
13. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.** Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990.
14. **Nakoryakov V. E., Kuznetsov V. E., Dontsov V. E., Markov P. G.** Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles // Intern. J. Multiphase Flow. 1990. V. 16, N 5. P. 741–749.

*Поступила в редакцию 17/IV 2003 г.,  
в окончательном варианте — 21/VII 2003 г.*

---