

УДК 532.529

ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ДВУХ РАЗНЫХ ГАЗОВ

В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков

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

Экспериментально исследованы структура и затухание волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками двух разных газов (фреона и гелия). Показано, что введение малого (по объему) количества высокотеплопроводных гелиевых пузырьков в жидкость с низкотеплопроводными фреоновыми пузырьками приводит к резкому увеличению интенсивности затухания уединенных волн давления.

Эволюция волн давления в жидкости с пузырьками газа достаточно хорошо изучена как экспериментально, так и теоретически (см. [1, 2]). В частности, показано, что начальное возмущение в газожидкостной среде может распадаться на уединенные волны — солитоны, свойства которых подробно изучены. Установлено, что основным механизмом диссипации волн в газожидкостных средах является теплообмен газа в пузырьках с окружающей жидкостью. В [3, 4] экспериментально исследованы структура и затухание уединенных волн давления умеренной интенсивности в газожидкостной смеси. В работах [5, 6] показано, что учет полидисперсности в газожидкостной среде приводит к дополнительному затуханию возмущений давления, при этом структура волны не меняется. Влияние неоднородности газожидкостной смеси и сжимаемости жидкости на структуру волны давления исследовано в работах [7, 8]. В [9, 10] обнаружено существование в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров осцилляторных уединенных волн (мультисолитонов), обусловленное наличием в среде двух степеней свободы. В [11, 12] экспериментально исследованы структура и затухание осцилляторных уединенных волн в жидкости с пузырьками газа при различных соотношениях радиусов пузырьков.

В данной работе экспериментально изучены структура и затухание волн давления умеренной амплитуды в жидкости со смесью пузырьков двух разных газов (фреона и гелия) для одинаковых и двух разных размеров пузырьков.

Опыты проводились на установке типа ударной трубы. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу с внутренним диаметром 0,053 м и длиной 1,5 м. Рабочий участок заполнялся жидкостью и насыщался пузырьками газа через два независимых генератора, расположенных в нижней части трубы. Генераторы пузырьков выполнены в виде калиброванных стеклянных капилляров. Более точный подбор капилляров в каждом генераторе производился с использованием видеосъемки газовых пузырьков. Это позволило получить газовые пузырьки в жидкости с разбросом размеров в пределах $\pm 5\%$. В качестве рабочей жидкости использовался 50 %-й (по массе) раствор глицерина в дистиллированной воде, в качестве газовой фазы — фреон 12 и гелий. Следует отметить, что температуропроводность гелия приблизительно в 50 раз больше температуропроводности фреона. Пузырьки газа при всплытии в жидкости имели

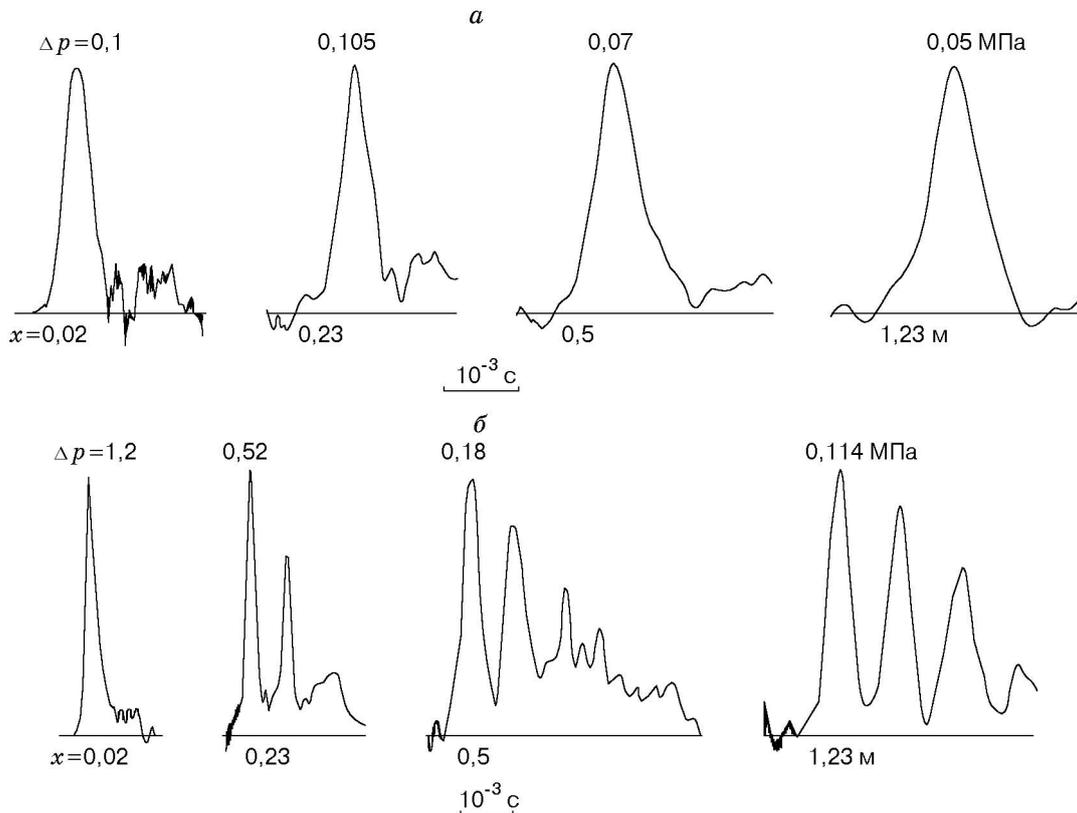


Рис. 1. Эволюция волны давления в жидкости с фреоновыми пузырьками ($d_f = 2,3$ мм, $\varphi_f = 1,2$ %):
 а — $\Delta p_0 = 0,1$ МПа; б — $\Delta p_0 = 1,2$ МПа

сферическую форму. Средняя по длине рабочего участка объемная доля газа в пузырьках $\varphi_{f,h}$ определялась по увеличению уровня жидкости в рабочем участке при введении пузырьков диаметром $d_{f,h}$. Индекс f соответствует фреону, h — гелию. Опыты проводились при атмосферном статическом давлении над уровнем газожидкостной среды p_0 .

Волны давления колоколообразной формы создавались электромагнитным излучателем, расположенным на дне рабочего участка, за счет отталкивания тонкой медной пластинки от электромагнитной катушки при прохождении через нее импульса тока. Профили волн давления регистрировались шестью пьезоэлектрическими датчиками, расположенными по длине рабочего участка. Сигналы с датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывались на компьютере.

Результаты экспериментов показали, что соотношение долей низкотеплопроводных фреоновых и высокотеплопроводных гелиевых пузырьков в газожидкостной смеси определяет структуру волны и существенно влияет на ее затухание. На рис. 1 показаны профили волн давления во времени на различных расстояниях x от места входа волны давления колоколообразной формы в жидкость с пузырьками фреона для двух начальных амплитуд волн Δp_0 (Δp — амплитуда волны или амплитуда первой осцилляции для группы уединенных волн и осциллирующих ударных волн). В случае малых амплитуд волн (рис. 1, а) из начального сигнала формируется уединенная волна (солитон) ($x = 0,23$ м), затухающая при распространении в среде вследствие диссипативных процессов. С увеличением амплитуды входящего в газожидкостную среду сигнала из него выделяются две и более уединенных волны (рис. 1, б), и на расстоянии $x = 1,23$ м они уже не связаны между собой.

Основным механизмом диссипации уединенных волн в жидкости с пузырьками газа

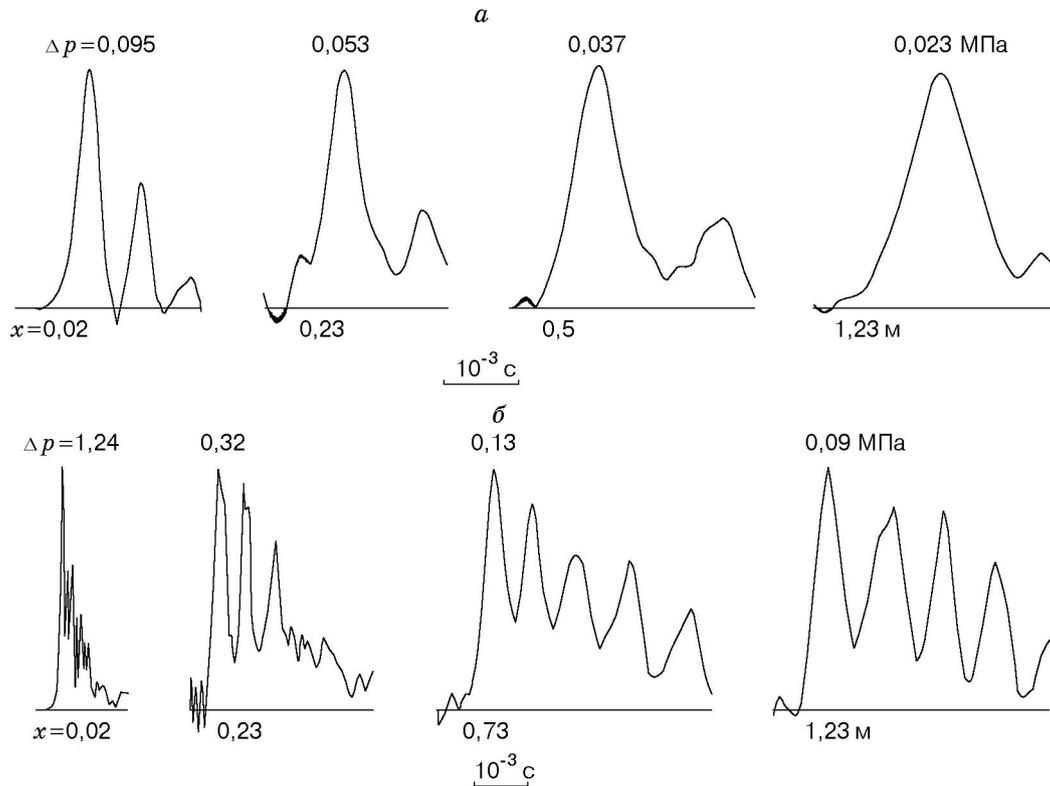


Рис. 2. Эволюция волны давления в жидкости со смесью пузырьков фреона и гелия ($d_f = d_h = 2,3$ мм, $\varphi_f = 1$ %, $\varphi_h = 0,2$ %):
 а — $\Delta p_0 = 0,095$ МПа; б — $\Delta p_0 = 1,24$ МПа

является теплообмен газа в пузырьках с окружающей жидкостью [1–3]. Основными параметрами, определяющими интенсивность теплообмена при сжатии пузырьков в волне, как показано в [3], являются температуропроводность газа, радиус пузырька, объемная доля газа и амплитуда уединенной волны.

На рис. 2 показана эволюция волны давления в жидкости с пузырьками фреона и малой объемной долей пузырьков гелия того же размера. В случае $\Delta p_0/p_0 \approx 1$ малая добавка пузырьков гелия в среду при сохранении полного объемного газосодержания приводит к резкому увеличению интенсивности затухания уединенных волн (рис. 2, а). Это обусловлено тем, что структура волны формируется главным образом фреоновыми пузырьками, а основной вклад в затухание вносят пузырьки гелия. С увеличением амплитуды входящей в среду волны диссипативные потери увеличиваются, что приводит к формированию осциллирующей ударной волны из начального сигнала (рис. 2, б). Увеличение диссипативных потерь с ростом амплитуды волны обусловлено увеличением теплообмена газовых пузырьков с жидкостью вследствие более интенсивного сжатия пузырьков в волне. Изменение структуры волны, в свою очередь, приводит к ослаблению затухания волны вследствие подпитки энергией переднего фронта осциллирующей ударной волны. В результате эффект усиления затухания волны вследствие добавки пузырьков гелия в среду для волн большой амплитуды менее значительный. Существенное увеличение интенсивности затухания волн большой амплитуды при введении малой добавки гелиевых пузырьков возможно в жидкости с пузырьками большего размера. Увеличение размера газовых пузырьков в жидкости позволяет сформировать из начального сигнала серию несвязанных уединенных волн. Так как интенсивность затухания несвязанных уединенных волн су-

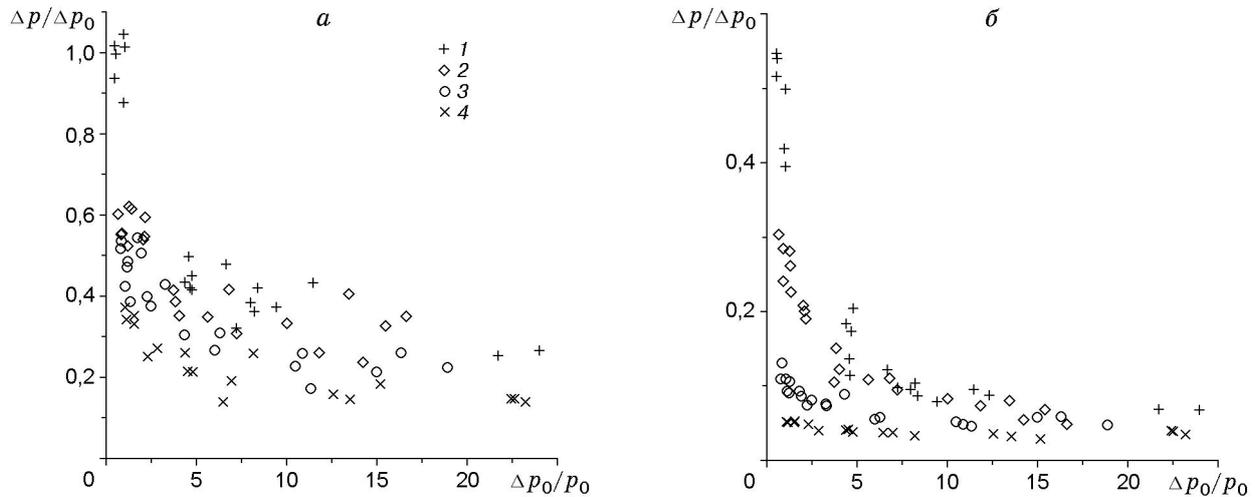


Рис. 3. Зависимость интенсивности затухания волны давления в жидкости со смесью пузырьков фреона и гелия от ее амплитуды ($d_f = d_h = 2,3$ мм):
 1 — $\varphi_f = 1,2$ %, $\varphi_h = 0$; 2 — $\varphi_f = 1$ %, $\varphi_h = 0,2$ %; 3 — $\varphi_f = 0,4$ %, $\varphi_h = 0,8$ %; 4 — $\varphi_f = 0$, $\varphi_h = 1,2$ %; а — $x = 0,23$ м; б — $x = 1,23$ м

щественно больше интенсивности затухания осциллирующей ударной волны, то эффект будет значительным.

Увеличение объемной доли гелиевых пузырьков в газожидкостной смеси приводит к увеличению интенсивности затухания волн давления. При большой объемной доле гелиевых пузырьков ($\varphi_h = 1$ %, $\varphi_f = 0,2$ %) из начального сигнала сразу формируются ударные волны, осцилляции которых быстро затухают, диссипативные процессы преобладают над нелинейными и дисперсионными даже для больших амплитуд волн, что приводит к быстрому сглаживанию осцилляций и формированию монотонной ударной волны.

На рис. 3 показана зависимость интенсивности затухания волны давления в жидкости с пузырьками фреона и гелия от амплитуды волны. На расстоянии $x = 0,23$ м (рис. 3,а) наблюдается сильное влияние концентрации гелиевых пузырьков в газожидкостной смеси на затухание волны, наиболее значительное при $\Delta p_0/p_0 \approx 1$ (точки 1, 2). С увеличением объемной доли гелиевых пузырьков в среде (при сохранении полного объемного газосодержания) интенсивность затухания волн увеличивается, а влияние концентрации гелиевых пузырьков на затухание волн значительно уменьшается. С увеличением амплитуды входящей в среду волны влияние концентрации гелиевых пузырьков на затухание волны уменьшается. Как показано выше, это обусловлено связыванием уединенных волн и формированием осциллирующей ударной волны. Достаточно большой разброс опытных данных на рис. 3,а обусловлен неоднородностью среды и тем, что зона формирования уединенных волн из начального сигнала сравнима с расстоянием от места входа волны в среду до точки измерения.

С увеличением расстояния x (рис. 3,б) наиболее сильное влияние концентрации гелиевых пузырьков на затухание волны наблюдается при $\Delta p_0/p_0 \approx 1$, когда уединенные волны еще не связаны в осциллирующую ударную волну. При этом с увеличением объемной доли гелиевых пузырьков в газожидкостной среде зависимость интенсивности затухания волны от ее амплитуды ослабевает, что обусловлено структурной перестройкой профиля волны.

В работах [4, 11] показано, что интенсивность затухания уединенных волн в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров больше, чем в жидкости с пузырьками газа одинакового размера при сохранении неизменными остальных параметров среды и

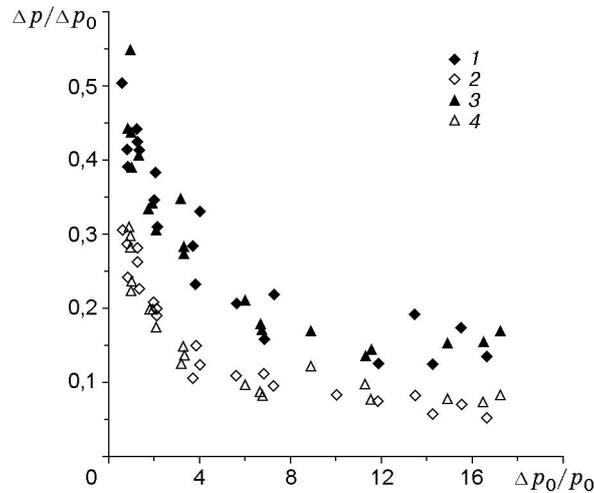


Рис. 4. Зависимость интенсивности затухания волны давления в жидкости со смесью пузырьков фреона и гелия от ее амплитуды ($d_f = 2,3$ мм, $\varphi_f = 1,0$ %, $\varphi_h = 0,2$ %):
 1, 3 — $x = 0,5$ м (1 — $d_h = 2,3$ мм, 3 — $d_h = 1,1$ мм); 2, 4 — $x = 1,23$ м (2 — $d_h = 2,3$ мм, 4 — $d_h = 1,1$ мм)

волны. Это обусловлено резонансными колебаниями обоих типов пузырьков, формирующей осциллирующую уединенную волну — мультисолитон. В данной работе получены экспериментальные данные о структуре и затухании волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками фреона с малой объемной долей пузырьков гелия меньшего размера. Оказалось, что изменение размера гелиевого пузырька более чем в два раза практически не оказывает влияния на структуру волны и ее затухание. По-видимому, диссипативные потери при сжатии гелиевых пузырьков малого размера очень велики, и пузырьки не могут совершать колебания на своей резонансной частоте и формировать совместно с фреоновыми пузырьками осциллирующую уединенную волну. Гелиевые пузырьки лишь “отслеживают” давление в волне, формируемой фреоновыми пузырьками. Поэтому уменьшение размера гелиевых пузырьков в жидкости со смесью фреоновых и гелиевых пузырьков не приводит к дальнейшему увеличению интенсивности затухания волн.

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности затухания волны давления в жидкости с пузырьками фреона и гелия одинакового размера (точки 1, 2) и двух разных размеров (точки 3, 4) от ее амплитуды на разных расстояниях x от места входа волны в среду. Точки 1 и 3 ($x = 0,5$ м) и точки 2 и 4 ($x = 1,23$ м) практически совпадают в широком диапазоне амплитуд волн $\Delta p_0/p_0$. Следовательно, введение в газожидкостную смесь пузырьков высокотеплопроводного газа (гелия) меньшего размера не приводит к увеличению интенсивности затухания волны.

В жидкости с пузырьками больших размеров, в которой общая диссипация меньше, по-видимому, возможно увеличение интенсивности затухания волн при введении в нее пузырьков газа двух разных размеров.

Таким образом, в работе показана возможность значительного увеличения интенсивности затухания волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками газа путем введения в среду малых объемных долей пузырьков высокотеплопроводного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.** Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1, 2.
3. **Донцов В. Е., Кузнецов В. Е., Марков П. Г., Накоряков В. Е.** Эволюция волн давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа // Акуст. журн. 1987. Т. 33, № 6. С. 1041–1044.
4. **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.
5. **Кедринский В. К.** Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–34.
6. **Шагапов В. Ш.** Структура ударных волн в полидисперсной смеси жидкость — пузырьки газа // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1976. № 6. С. 145–147.
7. **Beylich A. E., Gulhan A.** On the structure of nonlinear waves in liquids with gas bubbles // Phys. Fluids A. 1990. V. 2, N 8. P. 1412–1428.
8. **Kameda M., Shimaura N., Higashino F., Matsumoto Y.** Shock waves in a uniform bubbly flow // Phys. Fluids. 1998. V. 10, N 10. P. 2661–2668.
9. **Гасенко В. Г., Донцов В. Е., Кузнецов В. В., Накоряков В. Е.** Осциллирующие уединенные волны в жидкости с пузырьками газа // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. Т. 6, № 21. С. 43–45.
10. **Гасенко В. Г., Изергин В. П.** Стохастизация нелинейных волн в полидисперсной газожидкостной среде // Проблемы нелинейной акустики: Тр. XI Междунар. симп. по нелинейной акустике, г. Новосибирск, 24–28 авг. 1987 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1987. Т. 2. С. 23–25.
11. **Донцов В. Е., Кузнецов В. Е., Марков П. Г., Накоряков В. Е.** Распространение волн давления в жидкости с пузырьками газа разных размеров // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 1. С. 157–159.
12. **Накоряков В. Е., Донцов В. Е.** Мультисолитоны в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров // Докл. АН СССР. 2001. Т. 378, № 4. С. 483–486.

*Поступила в редакцию 24/X 2001 г.,
в окончательном варианте — 14/XII 2001 г.*
