

В. Е. Донцов, П. Г. Марков

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБЛЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ УМЕРЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

Известно, что жидкость с пузырьками газа является средой с ярко выраженными нелинейными и дисперсионными свойствами. Один из наиболее интересных волновых режимов в таких средах — распространение уединенных волн-солитонов [1, 2]. Они формируются за счет переизлучения пузырьками запасенной в процессе сжатия энергии волны давления. Однако при достаточно больших амплитудах волн происходит дробление пузырьков [3—5], что, по-видимому, должно существенно влиять на образование и структуру волн в жидкости с пузырьками газа. Описано [3—5] несколько механизмов дробления одиночных пузырьков в ударных волнах. Например, одной из причин разрушения пузырька может быть кумулятивная струя жидкости, образующаяся при воздействии волны на пузырек [3]. В [4, 5] предложен механизм дробления пузырька (Кельвина — Гельмгольца) вследствие образования неустойчивости из-за поступательного движения пузырька в волне давления. Разрушение может происходить также в результате развития неустойчивости Тейлора, т. е. из-за ускоренного движения границы раздела пузырек — жидкость в волне [2]. Таким образом, в литературе достаточно хорошо исследовано дробление одиночных пузырьков в волне давления и практически не изучено влияние раздробившихся пузырьков на структуру волны в газожидкостной среде.

В данной работе экспериментально исследовано поведение газовых пузырьков при распространении уединенных волн в жидкости с пузырьками газа для различных параметров волн и среды и изучено влияние дробления пузырьков на структуру волны.

Опыты проводились на установке «ударная труба» [6]. Рабочий участок заполнялся жидкостью и насыщался пузырьками газа через генератор пузырьков. Волна давления колоколообразной формы создавалась при ударе поршня о дно переходной камеры, заполненной жидкостью, и далее распространялась в рабочей камере. Профили волн давления регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными по длине рабочего участка и заделанными заподлицо с его внутренними стенками. Сигналы с датчиков подавались на электронно-лучевые осциллографы. Синхронно с прохождением волны в оптической вставке рабочего участка велась кино съемка пузырьков газа кинокамерой ВСК-5 со скоростью 50—250 тыс. кадр/с. Варьировались параметры волн и среды, а именно: интенсивность волны ($5 \leq \Delta p/p_0 \leq 100$), вязкость ($4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \leq \nu \leq 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$), поверхностное натяжение жидкости ($30 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м} \leq \sigma \leq 7 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$), размер ($1 \text{ мм} \leq R_0 \leq 2 \text{ мм}$) и несферичность пузырьков ($1 \leq \alpha \leq 2$) ($\alpha = a/b$, где a , b — большая и малая полуоси пузырька-эллипсоида). Постоянными оставались газосодержание $\varphi_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ и плотность жидкости $\rho_1 = 1,04 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 1 представлена осциллограмма профиля волны давления умеренной интенсивности в жидкости со сферичными пузырьками фреона радиусом $R_0 = 2 \text{ мм}$ в 80%-м растворе глицерина в воде на расстоянии $x = 0,32 \text{ м}$ от входа в газожидкостную среду (а) при $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $\nu = 76,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\sigma = 0,068 \text{ Н/м}$, а также кинограмма поведения газового пузырька в моменты времени, обозначенные цифрами на осциллограмме (б). В стадии сжатия пузырька наличие градиента давления в волне приводит к деформации передней кромки пузырька (рис. 1, б, 3; стрелка указывает направление распространения волны). Затем образуется лобовая кумулятивная струя, аналогичная описанной в [3] (рис. 1, б, 6). Струя пробивает пузырек и увлекает за собой часть газа в окружающую жидкость (рис. 1, б, 9). Большая вязкость жидкости стабилизирует этот процесс, и увлеченная струей часть газа является единым целым пузырьком (рис. 1, б, 9—13). Так образование кумулятивной струи приводит к делению пузырька на два, нанизанных на тонкую струю жидкости. Однако такое дробление практически не ведет к изменению структуры вол-

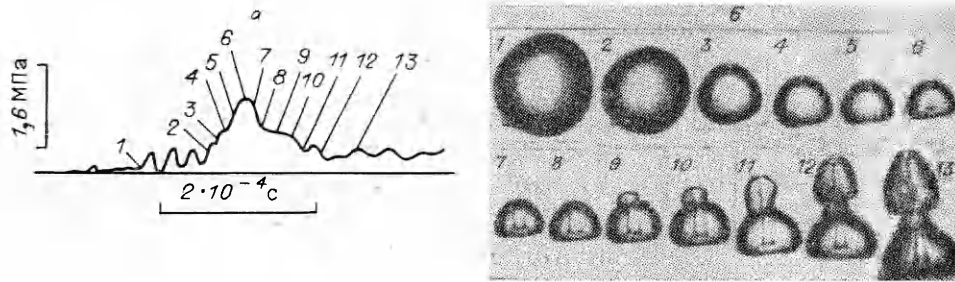


Рис. 1

ны при последующих осцилляциях пузырьков, так как радиус их при дроблении меняется незначительно.

Скорость кумулятивной струи повышается с увеличением амплитуды уединенной волны давления, соответственно большая масса газа увлекается струей в окружающую жидкость. При интенсивности волны давления $\Delta p/p > 50$ струя увлекает за собой весь газ пузырька. На рис. 2 видно, что начальный пузырек «перекачивается» струей в окружающую жидкость, сохраняя при этом свою целостность (рис. 2, б, в), и продолжает формировать совместно с остальными пузырьками уединенную волну давления (рис. 2, а, 11–14).

Качественно иное поведение пузырька в уединенной волне наблюдается в жидкости, заполненной пузырьками газа эллипсоидальной формы. На рис. 3, б дана кинограмма поведения азотного пузырька в волне давления (рис. 8, а): $R_0 = 1,5$ мм, $p_0 = 0,1$ МПа, $\alpha = 1,3$, $\nu = 15 \times 10^6$ м²/с, $\sigma = 0,068$ Н/м. Происходит пересжатие пузырька в направлении, перпендикулярном распространению волны (рис. 3, б, 3–6). Образуется кольцевая струя жидкости, направленная к центру пузырька.

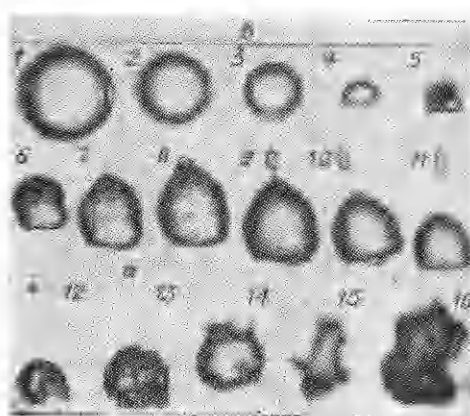
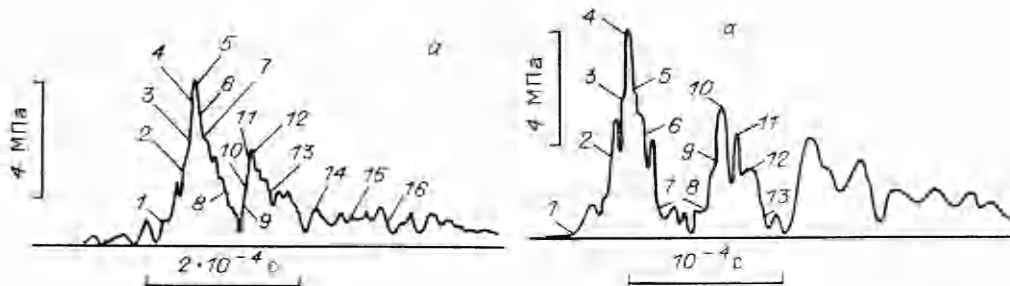


Рис. 2

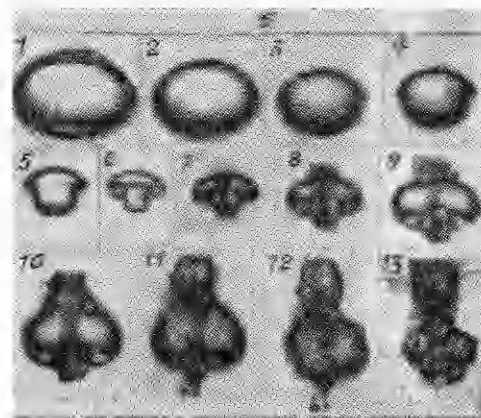
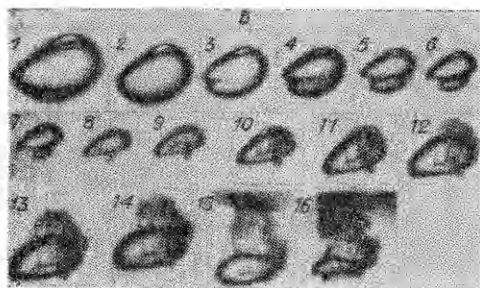
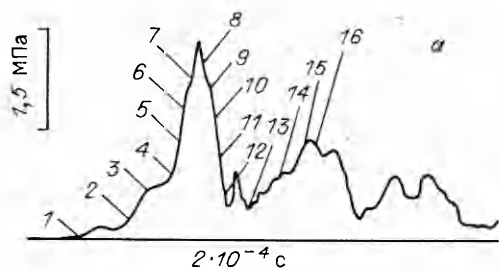


Рис. 3

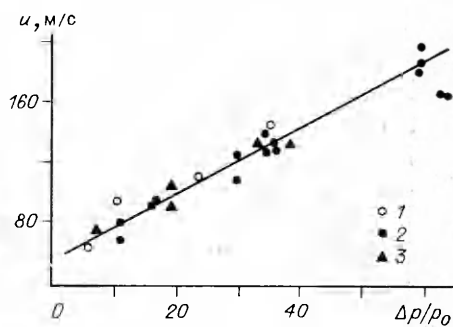


Р и с. 4

тив направления распространения волны (рис. 3, б, 7). Струя, движущаяся против направления волны, практически сразу тормозится при выходе из пузырька (рис. 3, б, 8). Опыты показали, что, хотя кумулятивная струя по направлению волны в несферичном пузыре движется с большей скоростью, чем в сферичном при тех же интенсивностях волн, она увлекает в окружающую жидкость меньшую часть газа, чем струя в сферичном пузыре. Это связано с тем, что «перекачивание» газа из пузырька происходит на более поздней стадии его расширения и пузырек имеет больший объем (рис. 3, б, 7–10). Однако, как и для сферичных пузырьков, такое дробление не оказывает существенного влияния на структуру волны. Раздробленные пузырьки продолжают осциллировать и формируют следующую единенную волну давления (рис. 3, б, 11–14).

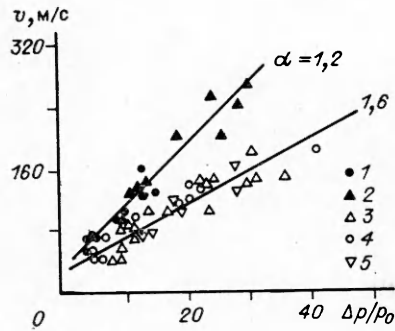
Известно, что при всплывании в слабовязкой жидкости пузырек с радиусом $R_0 \approx (1 \div 2)$ мм сильно вращается, и его форма помимо несферичности имеет и сильную асимметрию. Кинограмма разрушения такого пузырька в волне давления представлена на рис. 4 ($p_0 = 0,1$ МПа, $R_0 = 1,5$ мм, $\alpha = 1,6$, $\nu = 4 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\sigma = 0,068$ Н/м). Как и на рис. 3, здесь наблюдается образование кольцевой струи, но уже не равномерно по поверхности пузырька (рис. 4, б, 4). Там, где кривизна поверхности больше, струя образуется раньше и в каждый момент времени имеет скорость, большую, чем та часть струи, которая образовалась на противоположной поверхности. Кроме того, вследствие асимметрии пузырька разные части кольцевой струи движутся под разными углами по отношению к направлению волны. Это является причиной «нецентрального» замыкания кольцевой струи, когда часть ее при захлопывании не участвует в образовании кумулятивных струй, проходит мимо места замыкания кольцевой струи и устремляется к боковой стенке пузырька (рис. 4, б, 10). Эта часть кольцевой струи ударяется о поверхность пузырька и увлекает в окружающую жидкость часть газа из пузырька (рис. 4, б, 11–12). Однако такой боковой выброс газа из пузырька незначительно влияет на структуру волны, так как первоначальный пузырек мало изменяет свой размер.

Таким образом, эксперименты показали, что при струйном дроблении в волнах давления умеренной интенсивности пузырьки разрушаются на несколько крупных частей, которые продолжают осциллировать и фор-



Р и с. 5

Появление струи обусловлено несферичностью пузырька и наличием градиента давления на его поверхности. Аналогичная кольцевая струя жидкости при численном расчете захлопывания несферичной пустой полости у твердой стенки описана в [7]. При замыкании кольцевой струи образуются две кумулятивные струи: по и про-



Р и с. 6

мируют последующие волны, и влияние такого дробления на структуру уединенной волны незначительно.

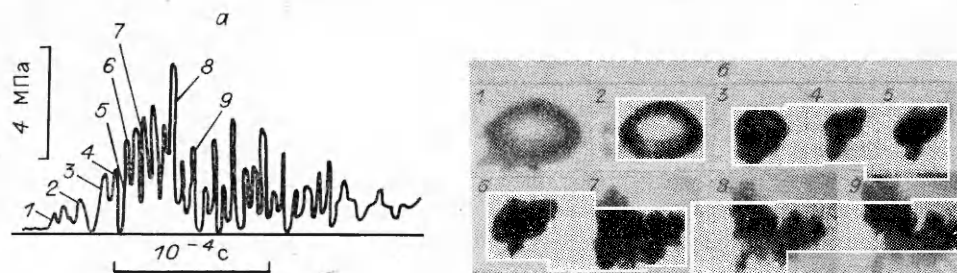
На рис. 5 даны результаты измерения средней скорости кумулятивной струйки жидкости в сферичном пузырьке u в зависимости от амплитуды уединенной волны $\Delta p/p_0$ в широком диапазоне изменения параметров среды: 1—3 — $R_0 = 2; 1; 1$ мм, $\sigma = 0,068; 0,068; 0,035$ Н/м, $\nu = 76,6 \cdot 10^{-6}; 76,6 \cdot 10^{-6}; 4 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно. Осреднение скорости кумулятивной струйки проводилось в интервале времени с момента ее образования до

момента выхода из пузырька. Скорость кумулятивной струйки не зависит от вязкости жидкости ν , поверхностного натяжения σ и размеров пузырьков R_0 в исследуемом диапазоне параметров. На рис. 6 приведена зависимость скорости кумулятивной струйки жидкости v внутри несферичного пузырька от амплитуды волны при различных значениях начальной деформации и параметров среды: 1—5 — $R_0 = 1; 1,5; 1; 1; 1,5$, $\nu = 4 \cdot 10^{-6}; 15 \cdot 10^{-6}; 4 \cdot 10^{-6}; 14 \cdot 10^{-6}; 4 \cdot 10^{-6}$ Н/м, $\sigma = 0,035; 0,068; 0,068; 0,035; 0,068$ Н/м соответственно. Как и для сферичных пузырьков, скорость кумулятивной струи не зависит от вязкости, поверхностного натяжения жидкости и размеров пузырьков, но существует зависимость от начальной деформации α . Это объясняется тем, что при меньших начальных деформациях ($\alpha \approx 1,2$) кольцевая струя замыкается под меньшим углом по отношению к направлению волны и основная часть жидкости уходит в кумулятивную струю, распространяющуюся по направлению волны давления.

Из рис. 5 и 6 видно, что скорость кумулятивной струи внутри несферичного пузырька больше, чем внутри сферичного, что соответствует расчетным данным [7].

Наряду со струйным механизмом дробления пузырьков для достаточно больших амплитуд волн $\Delta p/p_0 \geq 80$ в опытах наблюдается еще один, связанный с развитием неустойчивости границы раздела жидкость — газ и разрушением пузырька на мельчайшие газовые включения. Существуют два механизма развития неустойчивости границы раздела жидкость — газ [4]. Неустойчивость Рэля — Тейлора, которая возникает вследствие ускорения границы раздела, характеризуется критическим числом Бонда $B = \rho_1 a R^2 / \sigma$, где ρ_1 — плотность жидкости; a — ускорение границы пузырька. Относительное движение пузырька в жидкости при воздействии волны давления приводит к образованию неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, а критерий, характеризующий эту неустойчивость, есть число Вебера $W = \rho_2 \Delta U^2 R / 2\sigma$ (ρ_2 — плотность газа, ΔU — относительная скорость пузырька).

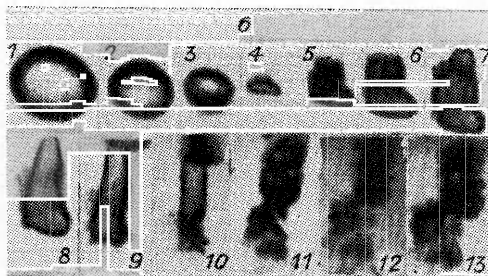
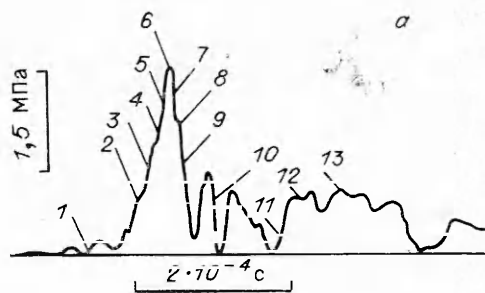
На рис. 7, б показано поведение пузырька фреона с радиусом $R_0 = 2$ мм в волне давления интенсивностью $\Delta p/p_0 \approx 80$ (профиль волны



Р и с. 7

изображен на рис. 7, а) при $\alpha = 1,6$, $\nu = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\sigma = 0,068 \text{ Н/м}$. Уже при первом сжатии граница пузырька теряет устойчивость и вся покрывается волнами (рис. 7, б, 4). Образование кумулятивной струи не происходит, а пузырек разрушается на мельчайшие части и уже не совершает осцилляций (рис. 7, б, 9, 10). Это приводит к тому, что уединенная волна не формируется из начального импульса и весь сигнал покрывается высокочастотными колебаниями из-за осцилляций мельчайших пузырьков.

На рис. 8, б) приведена кинопластинка поведения пузырьков более легкого газа Не в сильной волне давления (рис. 3, а). По сравнению с рис. 7. при прочих равных условиях в пузырьке Не образуется кумулятивная струя и разрушения на мелкие части в первой уединенной волне не наблюдается (рис. 8, б, 4). Следовательно, плотность газа в пузырьке является параметром, определяющим дробление пузырьков, т. е. в данных опытах реализуется механизм неустойчивости Кельвина — Гельмгольца. Дробление пузырьков вследствие неустойчивости Кельвина — Гельмгольца наблюдается в уединенных волнах и при меньших амплитудах, но на достаточно больших временах. Так, на рис. 2, б, 13 и рис. 3, б, 11 видно, что граница пузырька покрывается возмущениями, которые в дальнейшем приводят к его разрушению. Следовательно, большая вязкость жидкости препятствует развитию неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, наличие же боковых выбросов из-за «нецентрального» замыкания кольцевой струи ускоряет этот процесс.



Р и с. 8

ЛИТЕРАТУРА

1. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газопарожидкостных средах. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1983.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
3. Кедринский В. К., Солоухин Р. И. Сжатие сферической газовой полости в воде ударной волной // ПМТФ. — 1961. — № 1.
4. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Нигматулин Р. И., Тимофеев Е. И. Влияние плотности газа на дробление пузырьков ударными волнами // ДАН СССР. — 1977. — Т. 235, № 2.
5. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. и др. Исследование разрушения пузырьков газа в жидкости ударными волнами // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1975. — № 4.
6. Донцов В. Е., Кузнецов В. В., Марков П. Г., Накоряков В. Е. Эволюция волны давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа // Акуст. журн. — 1987. — Т. 33, № 6.
7. Воинов О. В., Воинов В. В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струйки // ДАН СССР. — 1976. — Т. 227, № 1.

г. Новосибирск

Поступила 22/V 1989 г.,
в окончательном варианте — 30/VI 1989 г.