

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА В ЖИДКОСТИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, С. А. ГУБИН, С. М. КОГАРКО,  
С. М. СИМАКОВ, Е. И. ТИМОФЕЕВ

(Москва)

Характер распространения ударных волн в различных средах связан с их характерными особенностями: сжимаемостью, теплофизическими свойствами, присутствием нескольких фаз и т. д. Структура ударной волны существенно изменяется в зависимости от свойств среды. Наиболее существенным свойством смеси жидкости с пузырьками газа является сжимаемость пузырьков газа под действием приложенного извне давления, например, в распространяющейся по газожидкостной среде ударной волне. От поведения пузырьков газа за ударным фронтом зависит обмен количеством движения и энергией между фазами и характер изменения давления за волной.

До последнего времени в работах (например, [1-3]) по теоретическому описанию структуры ударной волны в двухфазной среде, состоящей из смеси жидкости с пузырьками газа, поведение пузырьков описывалось традиционными соотношениями, установленными еще в работах Рэлея. Как правило, делалось предположение о сферической симметрии малых смещений поверхности пузырька. Правомерность подобных предположений для слабых волн давления, например для волн с перепадом давления на фронте  $p_1/p_0=1.1$ , как в [1, 2], еще не вызывает серьезных возражений, но перенос этих предположений на умеренно сильные волны с  $p_1/p_0=2$ , как в [3], требует экспериментального обоснования. Выше принято  $p_1$  — давление за фронтом волны и  $p_0$  — давление невозмущенной среды. В [4] уже было высказано предположение о возможности дробления пузырьков газа волной давления. Неучет подобных процессов, если они в действительности имеют место, может привести к серьезным качественным искажениям картины изменения параметров в ударной волне. Выполненные ранее исследования не содержат достаточной информации о поведении газовых пузырьков в жидкости за ударной волной.

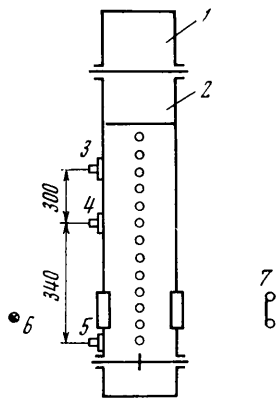
В работах [5, 6, 11] независимо было показано дробление пузырьков газа и предварительно найдено критическое условие для этого процесса. Это условие определяется заданием критического числа Вебера  $W^* = \rho_l u^2 d_0 (2\sigma)^{-1}$ , где в качестве определяющей скорости  $u$  взята либо скорость всплытия пузырьков навстречу волне [4, 5], либо скорость течения двухфазной среды за волной навстречу всплывающим пузырькам [5]. Здесь  $\rho_l$  — плотность жидкости,  $d_0$  — диаметр пузырька и  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости. В работе [6]  $W^* \approx 1$  для пузырьков газа размером 2 мм при  $p_0 = 0.5$  атм, а в работе [5]  $W^* \approx 3$  для пузырьков размером 2÷4 мм при  $p_0 = 1$  атм.

Ниже излагаются результаты подробного исследования влияния на процесс дробления пузырьков интенсивности ударной волны, начального давления, вязкости среды, размера пузырьков, длительности положительной фазы волны сжатия.

**1. Экспериментальная установка.** Опыты по исследованию характеристик процесса дробления воздушных пузырьков в газожидкостной среде проводились на гидродинамической трубе фиг. 1. Труба состояла из камер высокого 1 и низкого давления 2. На стенках камеры низкого давления закреплены датчики 3—5, служащие для запуска систем регистрации давления в ударной волне и системы фотографирования газовых пузырьков. Параметры волны регистрируются датчиками давления 4, 5 и записываются на осциллограф С1-33. Параметры волны необходимы для установления давления за волной, нахождения момента съемки. В заданный момент времени за волной производится фотографирование пузырьков. Подсветка при фотографировании осуществляется лампой — строботроном

6, а съемка ведется на неподвижную пленку 7. Длительность вспышки строботрона 20 мксек. Собственная частота датчиков давления 30 кГц. Точность отсчета времени по шкале осциллографа и точность измерения скорости волны 10%. Точность измерения давления 20—30%.

В процессе исследований основные параметры системы менялись в следующем диапазоне. Интенсивность волны менялась от  $p_1/p_0=2$  до  $p_1/p_0=20$ . Давление  $p_0=1-10$  бар, а  $p_1=2-60$  бар. Размер пузырьков менялся от 0.5 до 4 мм. Вязкость жидкости изменялась в интервале 1—1400 кг/м·сек. Длительность положительной фазы сжатия в волне 450—3000 мксек. Вязкость среды меняли за счет добавления в воду различного количества глицерина. Длительность фазы сжатия в волне задавалась длиной камеры высокого давления 1. В отдельных опытах менялась начальная скорость всплытия пузырьков, для чего трубка, подводящая газ, поднималась до уровня окон. Скорость всплытия пузырьков менялась при этом от 0 до 0.2—0.3 м/сек.



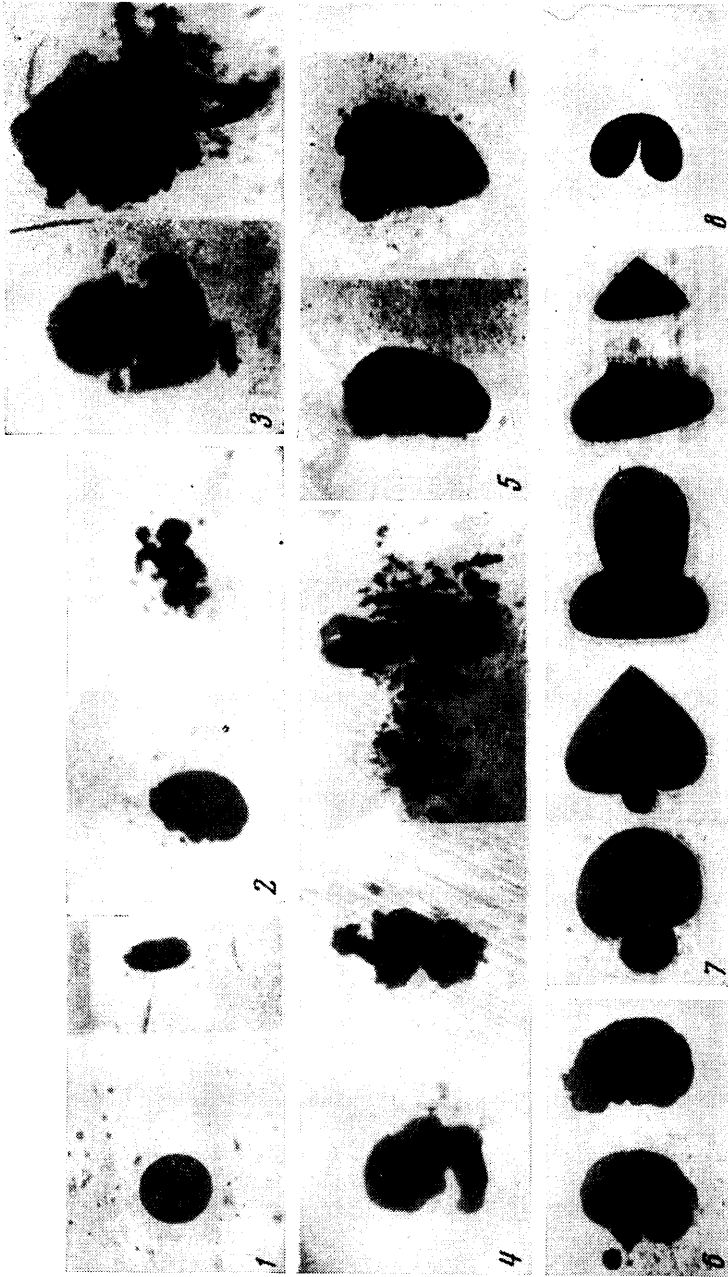
Фиг. 1

**2. Основные результаты экспериментов.** На фиг. 2 приведены кинограммы, отражающие поведение воздушных пузырьков в различных условиях. Серия фотографий 1 отражает изменение размеров пузырька с начальным диаметром 1 мм в волне с перепадом давления на фронте  $p_1/p_0=4$  ( $p_0=1$  бар). На первой регистрации приведено состояние пузырька перед фронтом и спустя 1460 мксек после взаимодействия волны с пузырьком. Как видно, в этот момент времени объем пузырька меньше начального и он деформирован. При повышении давления  $p_1$  можно достигнуть такого его значения, при котором пузырьки размером  $d_0=1$  мм будут разрушаться. Этому случаю отвечает серия фотографий 2. Пузырек снят спустя 260, 520 мксек после взаимодействия его с волной при параметрах волны  $p_1=15$  бар и  $p_0=1$  бар. Очевидно, что к моменту времени  $\tau \approx 500$  мксек произошло значительное разрушение пузырька.

Величина критической интенсивности возмущений, необходимых для разрушения пузырьков, существенно зависит от размеров пузырьков. В качестве примера представлена кинограмма 3 распада пузырька размером  $d_0=4$  мм в волне давления с перепадом  $p_1/p_0=4$ . Процесс разрушения пузырька зафиксирован в моменты времени  $\tau=160$  и 2100 мксек. Если пузырек диаметром  $d_0=1$  мм в волне с  $p_1/p_0=4$  не дробится, как это хорошо видно на фотографии 1 (фиг. 2), то пузырек размером  $d_0=4$  мм интенсивно разрушается уже к моменту времени 2100 мксек.

Влияние увеличения интенсивности волны на процесс разрушения пузырей можно наглядно видеть на кинограмме 4. Пузырьки диаметром  $d_0=3.5$  мм сняты в волне с перепадом давления  $p_1/p_0=15$  при  $p_0=1$  бар в моменты времени 90, 140, 750 мксек за волной. К моменту времени 700—600 мксек за волной пузырек полностью распадается на облако мельчайших газовых включений. Следовательно, с повышением перепада давления в волне процесс дробления пузырьков ускоряется, а спектр распыливания исходных газовых включений заметно утоньшается. Если при интенсивности волны, близкой к критической, исходный пузырек лишь делится на две части, то уже при перепаде давления, вдвое превышающем критическое значение, образуется множество пузырьков с размером  $(0.1 \div 0.01) d_0$ .

Анализ фотографий на кинограммах 3, 4 показывает, что начало раз-



Фиг. 2

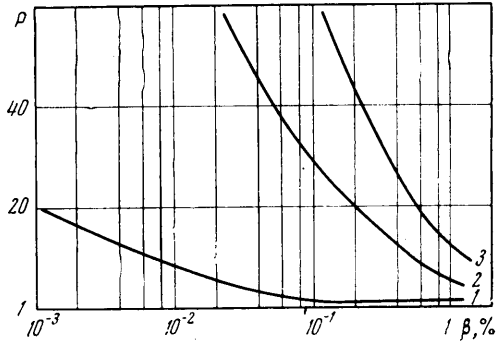
рушения пузырьков сопровождается пересжатием его центральной части. При этом внутри пузырька как бы прорывается струя жидкости. В жидкости малой вязкости, каковой является вода, угол раскрытия струи достаточно велик и струя представляется на фотографии в виде клина, проникающего внутрь пузырька. Увеличение начального давления в газожидкостной смеси приводит к затруднению дробления пузырьков газа в проходящей волне давления. На кинограмме 5 приведены фоторегистрации, отражающие состояние пузырька газа в моменты времени 1070 и 1620 мксек после начала взаимодействия пузырька газа с волной. Начальный диаметр пузырька газа был равен 4 мм, давление  $p_0=10$  бар, перепад давления на фронте волны  $p_1/p_0=4$ . Если при  $p_0=1$  бар и  $p_1/p_0=4$  за 1 мсек пузырь полностью разрушается, то при  $p_0=10$  бар к моменту времени 1 мсек вовсе не наблюдается распада пузырей.

Процесс дробления пузырьков газа существенно зависит и от длительности положительной фазы сжатия в волне давления. При длительности положительной фазы в волне давления данной интенсивности меньше некоторого критического значения наступает прекращение процесса дробления. На кинограмме 6 показаны состояния пузырька с начальным размером 3 мм в треугольной волне с перепадом давления на фронте  $p_1/p_0=10$  при  $p_0=1$  бар. Длительность положительной фазы сжатия 450 мксек. Состояния пузырька зафиксированы в моменты времени 260, 1430 мксек. Как видно, пузырек газа не разрушается в треугольной волне. В волне такой же формы и интенсивности, но и с длительностью фазы сжатия свыше 2 мсек, дробление наступает через 600 мксек. Авторы работ [7, 8], также наблюдали сохранение целостности пузырей размером  $7\div 20$  мм в волнах с  $p_1/p_0=11-21$  при длительности положительной фазы  $\Delta t=100$  мксек и пузырьков размером 10—30 мм в волнах с  $p_1/p_0=25-150$  при  $\Delta t < 100$  мксек.

При увеличении вязкости жидкости в 10—50 раз по сравнению с вязкостью воды не отмечается существенного изменения поведения пузырьков газа в волнах давления. Однако при дальнейшем росте вязких сил характер процесса дробления меняется. В качестве примера на кинограмме 7 показаны состояния газового пузырька в среде 90% глицерина и 10% воды в моменты времени 860, 940, 1020, 1900 мксек. Начальный размер пузырьков 5 мм, давление  $p_0=1$  бар,  $p_1/p_0=5$ , волна прямоугольной формы. Наблюдается замедление процесса дробления, укрупнение спектра деления пузырьков, последние имеют причудливую конфигурацию. При замене воды на смесь воды с добавкой 80% глицерина наблюдается изменение вида струи, вбрасываемой внутрь пузырька (фотография 8). На этой фотографии показан момент пробивания пузырька струей жидкости спустя 350 мксек за волной с перепадом давления  $p_1/p_0=6$  при  $p_0=1$  бар. С ростом вязкости жидкости размеры струи и ее конфигурация изменяются. В смеси, состоящей из 90% глицерина и 10% воды, пересжатие пузырьков совершается не в направлении волны, а перпендикулярно ей, и исходный пузырь делится на две части. Переход к чистому глицерину приводит к тому, что дробления пузырьков размером 4 мм не наблюдается, даже при  $p_1/p_0=40$  при  $p_0=1$  бар. В глицерине наблюдается лишь сжатие сферического пузырька к его равновесному размеру за времена  $\sim 100$  мксек. Никакой деформации пузырьков не происходит. Фототрирование процесса дробления более крупных пузырей на использованной установке не представлялось возможным, и это требует самостоятельного исследования.

**3. Обсуждение результатов.** В ранних работах по изучению неустойчивости всплывающих пузырьков газа в жидкости [4] предложено характеризовать критические условия дробления в отсутствие ударных волн ве-

личнои числа Вебера. Критическое значение установлено в виде  $W^* = \rho_1 u^2 d_0 (2\sigma)^{-1} \approx 1.5 \cdot 2$ . Здесь  $u$  — скорость всплытия пузырьков. Целесообразно, по-видимому, ввести подобный же критерий и для оценки условий дробления пузырьков, попадающих в волну давления. Волна давления, двигаясь по двухфазной среде, состоящей из газа и жидкости, приводит последнюю в движение со скоростью  $u_1 = (p_1 - p_0) / \rho_1 D$ . Здесь  $\rho_1$  — плотность двухфазной среды, мало отличающаяся от плотности жидкости при объемной концентрации газа до 20%,  $D$  — скорость волны. Тогда относительная скорость, с которой происходит встреча ударной волны со всплывающими пузырьками, будет  $u \pm u_1$ . Сложение скоростей всплытия и движения жидкости за волной имеет место при встречном движении волны и пузырьков, а вычитание скоростей — при спутном движении.



Фиг. 3

Обобщенное значение числа Вебера можно записать в виде  $W = \rho_1 (u \pm u_1)^2 d_0 (2\sigma)^{-1}$  или для двухфазной среды с объемной концентрацией пузырьков  $\beta$

$$W = \rho_1 d_0 \{ (p_1 - p_0) [(1 - \beta) \rho_1 c]^{-1} (p_0 / p_1)^{0.5} \pm u \}^2 (2\sigma)^{-1}$$

Здесь  $c$  — скорость звука в невозмущенной двухфазной среде, которая рассчитывается по соотношению  $c^2 = p_0 [\beta (1 - \beta) \rho_1]^{-1}$  [9]. В итоге число Вебера приобретает вид

$$W = \rho_1 d_0 \{ (p_1 - p_0) \beta^{0.5} [p_1 \rho_1 (1 - \beta)]^{-0.5} \pm u \}^2 (2\sigma)^{-1}$$

Представленное выражение справедливо при значениях  $\beta > 10^{-3}$ . При меньших величинах  $\beta$  скорость звука в жидкости

$$c^2 = c_1^2 p_0 [ (1 - \beta)^2 p_0 + \beta (1 - \beta) \rho_1 c_1^2 ]^{-1}$$

Анализ выполненных опытов и данных работ [5, 6] показывает, что для невязкой жидкости при  $\mu_1 = 1 - 100$  кг/мсек  $p_0 = 1$ ,  $p_1 = 1 \div 40$ ,  $d_0 = 0.5 - 4$  мм условие разрушения пузырьков можно записать в виде неравенства  $W > W^* = 2(p_0 / p_0^*)^n$ , где  $p_0^* = 1$  бар,  $n \approx 1$ . Тогда граница области существования процесса разрушения описывается при  $\beta > 10^{-3}$  уравнением  $W^* = 2p_0 / p_0^*$ . На фиг. 3 эта граница построена в координатах  $P = p_1 / p_0$   $\beta$  для  $d_0 = 1$  мм при  $p_0 = 1$  бар (кривая 1) и  $p_0 = 10$  бар (кривая 3), причем  $n = 1$ .

Область дробления пузырьков расположена над соответствующими кривыми. В отсутствие ударных волн первое слагаемое в скобках обращается в нуль и получается обычное соотношение для условий дробления всплывающего пузыря  $W^* \approx 1 \div 2$ . Видно, что в широких пределах изменения  $\beta = 10^{-3} \div 10^{-1}$  интенсивность волны, требуемая для дробления пузырьков размером 1 мм при  $p_0 = 1$  бар, остается постоянной. При построении кривых 1, 2 равновесная скорость всплытия принята равной  $u = 0.24$  м/сек [10].

Влияние размера пузырьков на их процесс дробления можно проследить, сравнивая кривые 2, 3. Кривая 3 — это граница начала дробления пузырьков размером  $10^{-3}$  м, а кривая 2 — граница начала дробления пузырьков с  $d_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  м при  $p_0 = 10$  бар.

Изменение критических условий разрушения пузырьков с уменьшением длительности волны тесным образом связано со временем начала их дробления. При оценке его значения за начало дробления принимался момент внедрения струей жидкости внутрь пузырька. С точностью  $\approx 50\%$  этот момент времени можно установить по соотношению  $\tau \approx d_0 (u \pm u_1)^{-1} \cdot (p_0 / p_1)^{0.33} = d_0 [(p_1 - p_0) / \rho_1 D \pm u]^{-1} (p_0 / p_1)^{0.33}$ . Окончание процесса распада наступает ко времени  $t \approx (2 \div 3) \tau$ . Условие прекращения дробления пузырьков с укорочением волны можно записать в виде  $W^{**} = W^* (1 - \tau \Delta t^{-1})^{0.33}$ . Здесь  $W^{**}$  — критическое число Вебера для распада пузырьков в короткой волне. Влияние вязкости жидкости на процесс дробления пузырьков можно описать с помощью критерияльного соотношения  $W_{\mu}^* = f(Lp) W^*$ . Здесь  $Lp = d \rho_1 \sigma \mu_1^{-2}$  — число Лапласа. Вид этой зависимости следующий:  $W_{\mu}^* = W^* (1 + k Lp^{-\alpha})$ . По предварительным оценкам  $k \approx 10$ , а показатель степени  $\alpha \approx 1$ . Таким образом, при некоторой критической интенсивности возмущения давления в смеси пузырьков и жидкости колебания пузырьков перестают иметь периодический характер и не являются сферически-симметричными. Деформация пузырька является необратимой неперодической. Представление о сферической симметрии колебаний допустимо применять лишь при докритических условиях, а при сверхкритических — в течение первого полупериода колебаний. При расчете параметров релаксационной зоны и структуры ударных волн в смеси жидкости с пузырьками необходимо учитывать перечисленные особенности поведения газовых пузырьков.

Поступила 17 I 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Noordzij L. Shock waves in mixtures of liquids and air bubbles. (Diss.), Twente Univ., 1973.
2. Бурдуков А. П., Кузнецов В. В., Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е., Покусев Б. Г., Шрейбер И. Р. Ударные волны в газожидкостной среде. ПМТФ, 1973, № 3.
3. Нигматуллин Р. И., Хабеев Н. С., Шагапов В. Ш. Об ударных волнах в жидкости с пузырьками газа. Докл. АН СССР, 1974, т. 214, № 4.
4. Hartunian R. A., Sears W. R. On the instability of small gas bubbles moving uniformly in various liquids. J. Fluid Mech., 1957, vol. 3, pt. 1.
5. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Симаков С. М., Тимофеев Е. И. Разрушение воздушных пузырьков в жидкости ударной волной. Докл. АН СССР, 1975, т. 220, № 4.
6. Hermans W. On the instability of a translating gas bubble under the influence of a pressure step. Philips Res. Rept. Suppl., 1973, Nr. 3.
7. Кедринский В. К., Солоухин Р. И. Сжатие сферической газовой полости в воде ударной волной. ПМТФ, 1961, № 1.
8. Jensen F. V. Response of an air bubble in water to a shock wave. Rept Dan. Cent. Appl. Math. and Mech., 1973, No. 49.
9. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости. Механика, Период. об. перев. иностр. статей, 1968, № 3.
10. Уоллис Г. Б. Одномерные двухфазные течения. М., «Мир», 1972.
11. Нецименко Ю. П., Суворов Л. Я. Слабые ударные волны в кипящей воде и газожидкостных суспензиях. Атомная энергия, 1972, т. 33, вып. 1.