

УДАРНАЯ ВОЛНА В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ

*А. П. Бурдуков, В. В. Кузнецов, С. С. Кутателадзе,
В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейбер*

(Новосибирск)

Распространение слабых ударных волн, условия их существования в газожидкостной среде изучены в [1]. Рассмотрению сильных ударных волн в жидкости, содержащей пузырьки газа, посвящена работа [2]. Исходя из общих результатов нелинейной волновой динамики, в [3] показана возможность существования в такой среде ударной волны с осциллирующим профилем давления во фронте. В работах [4, 5] показано, что ударная волна в газожидкостной смеси действительно имеет профиль с осциллирующим давлением. Недостатком работ [3-5] является необходимость постулировать существование ударных волн. Это связано с отсутствием прямого учета диссипативных эффектов в исходных уравнениях.

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному изучению структуры ударной волны в газожидкостной смеси. В рамках гомогенной модели двухфазной среды показано, что структуру ударной волны можно изучать на основе уравнения Бюргера — Кортевега — де Вриза. Результаты пьезоэлектрических измерений профиля давления во фронте ударной волны качественно совпадают с теоретическими представлениями о структуре ударной волны.

1. Структура ударной волны. В работе [6] показано, что в одномерном случае распространение низкочастотного возмущения конечной амплитуды в газожидкостной смеси подчиняется уравнению Бюргера — Кортевега — де Вриза

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (1.1)$$

где u — возмущение скорости смеси.

В случае, когда вязкость смеси определяется только диссипативными потерями на границе газ — жидкость, коэффициенты уравнения (1.1) принимают вид [7]

$$\gamma = \frac{2}{3} \frac{\nu}{c_0(1-c_0)}, \quad \beta = \frac{1}{6} \frac{R_0^2 c_0}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \quad \left(\alpha_0 = \frac{4}{3} \pi R^3 N \rho \right)$$

Здесь ν — кинематический коэффициент вязкости, α_0 — газосодержание, ρ — плотность смеси, N — число пузырьков в единице массы, R_0 — равновесный радиус пузырька, c_0 — скорость низкочастотного звука.

Стационарные решения этого уравнения могут описывать структуру слабой ударной волны [7, 8]. Однако рассмотрение структуры ударной волны в газожидкостной смеси на основе стационарных решений этого уравнения требует дополнительного обоснования.

Известно [3, 7, 8], что в процессе распространения возмущения диссипация уравновешивает нелинейные эффекты и способствует установлению стационарной формы волны — формируется фронт ударной волны. В газожидкостной среде такими потерями могут быть диссипация при радиальных пульсациях одиночного пузырька за счет проскальзывания пузырьков

во фронте волны. В работе [5] показано, что для ударных волн, ширина которых d значительно превышает радиус пузырьков R , диссипация за счет радиальных пульсаций преобладает над диссипацией за счет проскальзывания. Этим доказана возможность рассмотрения ударной волны на основе модели гомогенной среды.

Подставляя в (1.1) $u = u(x - Vt)$ и интегрируя один раз [7] при условии $u = u' = u'' = 0$ при $x \rightarrow \infty$, получаем

$$\beta u'' - \gamma u' - u^2/2 - Vu = 0 \quad (1.2)$$

Ограниченные решения уравнения (2.1) описывают структуру ударной волны, скорость которой $V = \Delta u/2$ в системе отсчета, движущейся со скоростью C_0 , Δu — скачок скорости. На фиг. 1 представлен результат численного расчета структуры слабой ударной волны, выполненный на основе уравнения (1.2), которое предварительно приведено к безразмерной форме с использованием соотношений

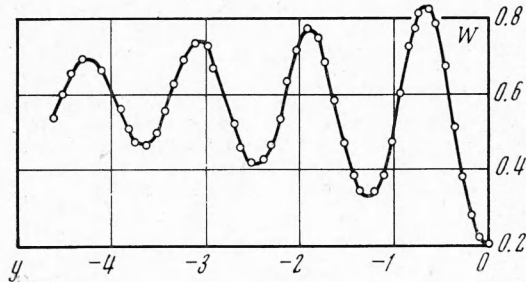
соотношений

$$W = u / c_0, \quad y = x - Vt / d$$

$$\beta_+ = \beta / d^2 c_0, \quad \gamma_+ = \gamma / d c_0$$

Ударная волна распространяется в направлении положительных x .

Фиг. 1 показывает результаты численного решения уравнения (2.1) при $\beta_+ = 10^{-2}$, $\gamma_+ = 5 \cdot 10^{-3}$, $M = 1.3$. Видно, что скорость в ударной волне имеет



Фиг. 1

осциллирующий характер. При определенных значениях диссипативного γ_+ и дисперсионного β_+ коэффициентов ударная волна будет иметь монотонную структуру. Область значений этих коэффициентов, соответствующих осциллирующему профилю ударной волны, можно определить из асимптотического рассмотрения решений уравнения (1.2) при $y \rightarrow -\infty$ [7]. В этой области выполняется неравенство $\dot{\gamma} < (4\beta V)^{1/2}$ или в терминах гомогенной модели газожидкостной среды

$$\nu / R_0 c_0 < [^{3/2} (M - 1) \alpha_0 (1 - \alpha_0)]^{1/2} \quad (M = u_1 / c_0 = p_1 / p_0) \quad (1.3)$$

Здесь u_1 — скорость ударной волны в неподвижной системе отсчета, p_0 — давление перед ударной волной, p_1 — давление в ударной волне.

2. Экспериментальное изучение структуры ударной волны. Для исследования профиля давления во фронте ударной волны был использован пьезоэлектрический метод измерения давления, для которого характерна малая инерционность, хорошая чувствительность и частотно-независимая характеристика в исследуемом диапазоне частот. Использовались пьезоэлектрические датчики с частотно-независимой характеристикой от 20 кгц до 50 кгц.

На фиг. 2 изображена принципиальная схема экспериментальной установки. Ударная труба 1 длиной 100 см, внутренним диаметром 6 см была изготовлена из органического стекла. Газожидкостная смесь создавалась вдувом азота в жидкость через пористый стеклянный фильтр 2, расположенный в нижней части трубы. Использовались стеклянные фильтры ПС-1 и ПС-4, позволившие получить пузыри диаметрами 0.02 и 0.3 см.

Пузыри диаметром до 0.6 см получались с помощью перфорированного диска. Радиус мелких пузырей определялся фотографированием.

Объемное газосодержание смеси α_0 изменялось в пределах от 0.01 до 0.15. Газосодержание определялось из выражения $\alpha_0 = h_1 - h_0 / h_1$, где h_0 — высота столба жидкости в ударной трубе без пузырей газа, h_1 — высота столба жидкости, содержащей пузыри газа, h_1 и h_0 измерялись с помощью катетометра КМ-3 с точностью до ± 1 мм.

Возмущающий импульс создавался разрывом диафрагмы 3, которая разделяла камеру высокого давления 4 и рабочую часть ударной трубы. В качестве диафрагмы использовались один или несколько листов целлофана, толщиной 0.04 мм. Время разрушения диафрагмы превышало $2 \cdot 10^{-5}$ сек. Оно оценивалось по времени нарастания давления во фронте ударной волны, распространяющейся в воздухе. Давление p_0 всегда было равно атмосферному.

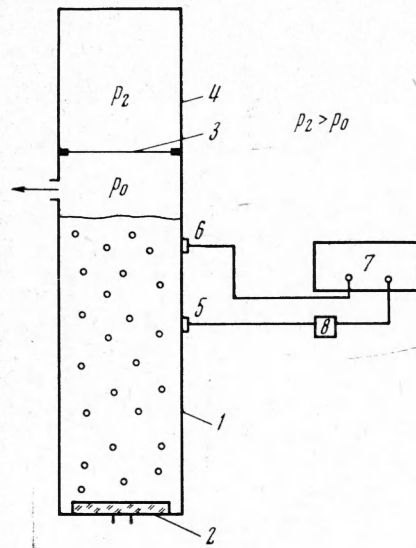
По длине ударной трубы располагались два пьезоэлектрических датчика давления марки ЛХ601, заделанные заподлицо со стенкой ударной трубы. Сигнал с датчика 5 подавался на катодный повторитель 8 и затем на электронно-лучевой осциллограф 7 типа ПМ-1, с экрана которого производилось фотографирование процесса. Датчик 6 служил для запуска развертки электронно-лучевого осциллографа.

Проводился ряд специальных экспериментов по измерению уровня «шума» всплывающих пузырей и оценивалось влияние упругих волн, возникающих в стенке ударной трубы при разрыве диафрагмы. Искажения сигнала, обусловленные этими факторами, были порядка толщины луча на экране осциллографа. Влияние отраженных волн было исключено выбором времени развертки, расстояния от датчика до дна ударной трубы, длины камеры высокого давления. Отраженные волны регистрировались датчиком через промежуток времени, больший длительности развертки.

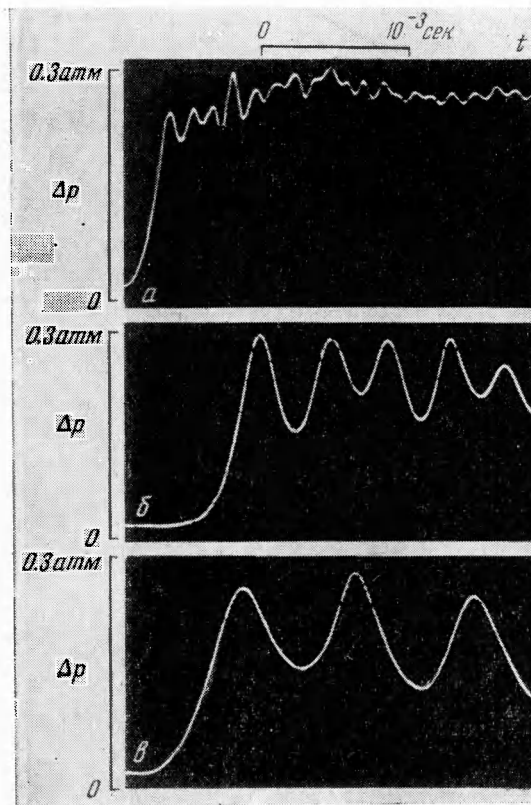
3. Результаты эксперимента. На фиг. 3, а, б, в показаны осциллограммы давления во фронте ударной волны, распространяющейся в газожидкостной смеси, при неизменной интенсивности ударной волны в зависимости от радиуса пузырька: а — $R_0 = 0.01$ см, $\alpha_0 = 0.06$, б — $R_0 = 0.15$ см, $\alpha_0 = 0.03$, в — $R_0 = 0.3$ см, $\alpha_0 = 0.06$. Вязкость жидкости $\nu = 10^{-2}$ см/сек, число Маха $M = 1.12$. На фиг. 3, а, б, в отчетливо видно увеличение частоты осцилляций во фронте ударной волны и уменьшение их амплитуды с уменьшением радиуса пузырька.

На фиг. 4, а, б представлена зависимость амплитуды и частоты осцилляций во фронте волны от ее интенсивности. Здесь $\alpha_0 = 0.06$, $R_0 = 0.15$ см, $\nu = 10^{-2}$ см/сек.

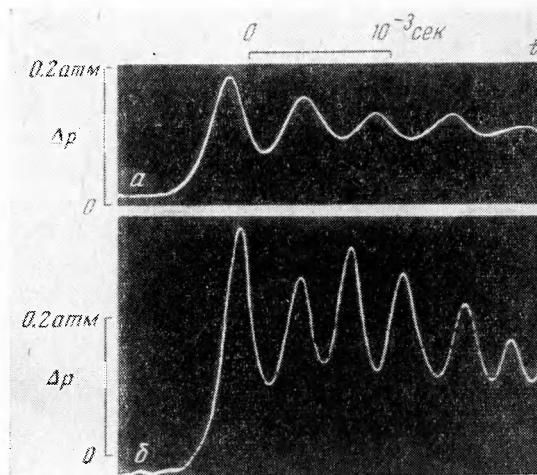
В экспериментах [1] ударных волн с осциллирующим профилем давления не наблюдалось. Это, по-видимому, связано с тем, что в экспериментах авторы использовали 50%-ный раствор глицерина в воде, и анализ остальных параметров проведенного ими эксперимента, исходя из (1.3), указывает, что в этих условиях ударная волна имеет монотонный профиль.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

При определенном соотношении параметров ударной волны и газожидкостной среды возможно существование ударных волн с осциллирующим профилем давления. Установлен критерий существования ударной волны с осциллирующим давлением в таких средах.

Частота и амплитуда осцилляций давления во фронте ударной волны зависят от ее интенсивности, диаметра пузырей и вязкости жидкости.

Полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с теоретическими представлениями об ударной волне, следующими из однородной модели газожидкостной среды. Необходимо отметить, что аналогичные экспериментальные результаты получены в [10].

Поступила 21.VII.1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Campbell I. J., Pitcher A. S. Shock waves in a liquid containing gas bubbles. Proc. Soc., Ser. A, 1958, vol. 243, No. 1235.
2. К е д р и н с к и й В. К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа. ПМТФ, 1968, № 4.
3. Б э т ч е л о р Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости, Механика. Период. сб. перев. иностр. статей, 1968, № 3.
4. С р е с р о А. Sound and shock waves in liquids containing bubbles. Phys. Fluids, 1969, vol. 12, No. 11.
5. Van Wijngaarden L. On the structure of shock waves in liquid — bubble mixtures. Appl. Sci. Res., 1970, vol. 22, No. 5.
6. Н а к о р я к о в В. Е., С о б о л е в В. В., Ш р е й б е р И. Р. Длинноволновые возмущения в газожидкостной среде. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 5.
7. Devin Ch. Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating air bubbles in water. J. Acoust. Soc. America, 1959, vol. 31, No. 12.
8. К а р п м а н В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. Новосибирск, Изд. Новосибирск. ун-та, 1968.
9. К а д о м ц е в Б. Б., К а р п м а н В. И. Нелинейные волны. Усп. физ. н., 1971, т. 103, вып. 2.
10. Noordzij L. Shock waves in bubble—liquid mixtures. Phys. Commun., 1971, vol. 3, No. 1.