

Член-корреспондент АН СССР С. С. КУТАТЕЛАДЗЕ, А. П. БУРДУКОВ,  
В. В. КУЗНЕЦОВ, В. Е. НАКОРЯКОВ, Б. Г. ПОКУСАЕВ, И. Р. ШРЕЙБЕР

### О СТРУКТУРЕ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ

Распространение слабых ударных волн, условия существования их в газожидкостной смеси изучены в (1). Рассмотрению сильных ударных волн на основе модели (2) посвящена работа (3). Впервые на особенность структуры ударных волн в жидкости, содержащей пузырьки газа, указано в (4). В работе (5) на основе модели среды (6) и в (7) показано, что структура ударной волны может иметь осциллирующий характер. Основным недостатком работ (5, 7) является необходимость постулировать существование ударной волны.

Если в моделях газожидкостной смеси (6, 8) для получения уравнения состояния воспользоваться уравнением Рэлея в форме (9), учитывающей диссипацию газожидкостной смеси, то существование ударных волн можно не постулировать.

Используя некоторые соотношения (4), в предположении постоянства весовой концентрации газовой фазы  $N$ , уравнение Рэлея (9) можно записать в виде, обеспечивающем простую и явную связь между вариацией давления и плотности в смеси:

$$\delta P = \frac{P_0}{\alpha_0(1-\alpha_0)\rho_1} \delta \rho + \frac{4}{3} \frac{\nu}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \delta \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{3} \frac{R_0^2}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \delta \frac{d^2\rho}{dt^2}; \quad (1)$$

$\rho_1$  — плотность жидкости,  $P_0$  — равновесное давление в смеси;  $\alpha_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3 N \rho$ ,  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $P_0 / [\alpha_0(1-\alpha_0)\rho_1] = c_0^2$  — квадрат низкочастотной скорости звука,  $R_0$  — равновесный радиус пузырька.

Если уравнения гомогенной модели (10) дополнить соотношением (1) или в уравнениях моделей жидкости с пузырьками (6, 8) использовать запись уравнения состояния в форме (1) с учетом диссипативных потерь на пузырьках, то уравнение моделей (6, 8, 10) принимают вид системы уравнений Навье — Стокса — Буссинеска (11):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \Delta \mathbf{u} + \frac{c_0^2}{\rho} \nabla \rho = \frac{4}{3} \frac{\nu}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \Delta \mathbf{u} - \frac{c_0^2 R_0^2}{3\alpha_0(1-\alpha_0)\rho_1} \Delta \nabla \rho, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  и  $\mathbf{u}$  — возмущения плотности и скорости смеси соответственно.

В одномерном случае, из системы (2) — (3) в предположении малости коэффициентов при старших производных следует одно уравнение для возмущений, например, скорости (12):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \quad (4)$$

$\mu = \frac{2}{3}\nu / [\alpha_0(1-\alpha_0)]$  — эффективная вязкость смеси, коэффициент  $\beta = \frac{1}{6}R_0^2 c_0 / [\alpha_0(1-\alpha_0)]$ .

Уравнение (4) записано в системе отсчета, движущейся со скоростью  $c_0$ . Стационарные решения полученного уравнения Кортевега — де-Фри-

за — Бюргера описывают структуру слабой ударной волны (<sup>12</sup>, <sup>13</sup>). В случае, когда выполняется неравенство

$$v/(R_0 c_0) < [^{3/2} \alpha_0 (1 - \alpha_0) (M - 1)]^{1/2}, \quad (5)$$

возможно существование фронта ударной волны в газожидкостной смеси с осциллирующей структурой. Здесь  $M$  — число Маха ударной волны. Неравенство (5) следует из асимптотического рассмотрения стационарного решения уравнения (4) при  $x \rightarrow -\infty$  (<sup>12</sup>, <sup>13</sup>).

Целью проведенных экспериментов была качественная проверка теоретических представлений об ударной волне, распространяющейся в газожидкостной среде. При исследовании структуры фронта ударной волны использовали пьезоэлектрический метод измерения. Были использованы

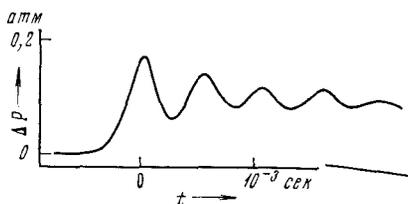


Рис. 1. Профиль ударной волны.  
 $R_0 = 0,15$  см,  $\alpha_0 = 0,06$ ,  $v = 10^{-2}$   
см<sup>2</sup>/сек

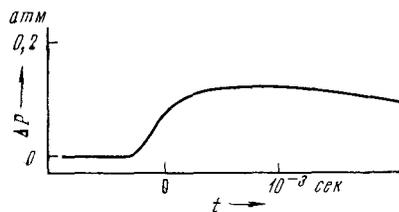


Рис. 2. Профиль ударной волны для  
40% водо-глицеринового раствора.  
 $R_0 = 0,01$  см,  $\alpha_0 = 0,06$ ,  $v = 4 \cdot 10^{-2}$   
см<sup>2</sup>/сек

пьезоэлектрические датчики давления ЛХ609 с частотно-независимой характеристикой от 20 до 50 кгц и чувствительностью 6,3 в/бар.

Экспериментальная установка представляла собой прозрачную вертикальную трубу из органического стекла с внутренним диаметром 6 и длиной 100 см. Газожидкостная смесь создавалась вдвум азота в жидкость через пористую пластинку, расположенную в нижней части трубы. Применяя различные пористые пластины, получали пузыри диаметром 0,02; 0,3; 0,6 см. Объемное газосодержание смеси определялось из выражения  $\alpha_0 = (h_1 - h_0) / h_1$ , где  $h_0$  — высота жидкости без пузырьков газа,  $h_1$  — высота жидкости, содержащей пузырьки газа. Газосодержание изменялось в пределах от 0,01 до 0,15 и регулировалось расходом азота.

Возмущающий импульс создавался разрывом диафрагмы, расположенной в верхней части трубы. Диафрагма представляла собой один или несколько листов целлофана. Время разрушения диафрагмы  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  сек.

Пьезоэлектрические датчики давления располагались по длине ударной трубы заподлицо с ее внутренней стенкой. Сигнал с датчика подавался на катодный повторитель и затем на электронно-лучевой осциллограф РМ-1, с экрана которого производилось фотографирование процесса. 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.

Влияние отраженных волн было исключено выбором времени развертки, расстояния от датчика до дна ударной трубы, длиной камеры высокого давления. Отраженные волны регистрировались датчиком через промежутки времени, большой длительности развертки  $\tau_p$ .

На рис. 1 показана типичная осциллограмма осцилляций давления во фронте ударной волны, распространяющейся в водо-азотной смеси ( $\tau_p = 3$  мсек.;  $\alpha_0 = 0,06$ ;  $R_0 = 0,15$  см;  $v = 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/сек;  $M = 1,08$ ). Увеличение интенсивности ударной волны при прочих неизменных параметрах приводит к увеличению частоты и относительной амплитуды колебаний во фронте ударной волны. Увеличение диаметра пузыря при остальных

фиксированных параметрах приводит к уменьшению частоты и увеличению относительной амплитуды колебаний во фронте ударной волны.

На рис. 2 показана осциллограмма давления во фронте ударной волны, распространяющейся в газожидкостной среде с искусственно увеличенной вязкостью жидкой фазы. Жидкая фаза в этой смеси — 40% раствор глицерина в воде. Ударная волна и газожидкостная смесь имеют параметры:  $M = 1,06$ ;  $\alpha_0 = 0,06$ ;  $R_0 = 0,01$  см;  $\nu = 6 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/сек;  $\tau_p = 3$  мсек. Профиль давления во фронте ударной волны имеет монотонный характер. Оценки, проведенные по соотношению (5), показывают, что для таких параметров ударная волна и не должна иметь осциллирующий профиль. Таким образом, результаты экспериментов качественно совпадают с теоретическими представлениями, следующими из гомогенной модели двухфазной среды и приближения невзаимодействующих пузырьков.

В заключение отметим, что в широко известных экспериментах (1) осциллирующий профиль ударных волн не наблюдался. Это, по-видимому, вызвано тем, что авторы (1) использовали 50% раствор глицерина в воде, в результате чего параметры их эксперимента не удовлетворяли условию существования ударной волны с осциллирующим профилем (5).

Институт теплофизики  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Новосибирск

Поступило  
28 IX 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> L. J. Campbell, A. S. Pitcher, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 243, 1, 235 (1958).  
<sup>2</sup> С. В. Иорданский, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 3, 102 (1960). <sup>3</sup> В. К. Кедринский, там же, № 4, 29 (1968). <sup>4</sup> Г. К. Бэтчелор, Механика, Периодич. сборн. пер., 3, 109, 65 (1968). <sup>5</sup> L. Van Wijngarden, Appl. Sci. Res., 22, № 5, 366 (1970). <sup>6</sup> L. Van Wijngarden, J. Fluid Mech., 33, № 3, 465 (1968). <sup>7</sup> A. Crespo, J. Phys. Fluids, 12, № 11, 227 (1969). <sup>8</sup> Б. С. Когарко, ДАН, 137, № 6 (1961). <sup>9</sup> Ch. Derin, J. Acoust. Soc. Am., 31, № 12, 1654 (1959). <sup>10</sup> A. A. Zwick, J. Math. and Phys., 37, № 3, 4, 339 (1958—1959). <sup>11</sup> А. П. Бурдуков, В. Е. Некоряков и др., Бюлл. численных методов механики сплошной среды, 2, № 5 (1971). <sup>12</sup> В. И. Карпман, Нелинейные волны в диспергирующих средах, Курс лекций Новосибирск. гос. унив., Новосибирск, 1968. <sup>13</sup> Б. Б. Кадомцев, В. И. Карпман, УФН, 103, в. 2, 2 (1971).