

03

Теоретическое исследование неравновесных процессов в ударной волне в пузырьковой жидкости

© В.А. Битюрин, В.Ю. Великодный, А.А. Быков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
Московский физико-технический институт
E-mail: Bityurin@ihed.ras.ru; vvelikodny@mail.ru

В окончательной редакции 8 октября 2010 г.

Исследуются эффекты поступательной неравновесности во фронте ударной волны в пузырьковой жидкости при объемных газосодержаниях $0.3 \leq \varphi \leq 0.98$. Получены аналитические выражения для продольного и поперечного давления, продольной и поперечной температуры, вязких напряжений, теплового потока. Проведены расчеты этих величин при различных числах Маха и объемных газосодержаниях. Анализируется влияние эффектов поступательной неравновесности во фронте ударной волны на процесс дробления.

Исследование течений газожидкостных потоков, их устойчивости, в том числе и при наличии ударных волн (УВ) при высоком объемном газосодержании $0.3 \leq \varphi \leq 0.98$, представляет значительный интерес в прикладном и фундаментальном плане. Это в первую очередь связано с тем, что такая среда обладает значительной поверхностью раздела фаз. Последнее приводит к ускорению протекания гетерогенных реакций с уменьшением диаметра пузырьков. Кроме того, скорость звука в такой среде на порядок меньше, чем в газе, и на два порядка меньше, чем в жидкости [1,2], поэтому при адиабатическом сжатии пузырьков в УВ могут возникать высокие температуры при весьма умеренных скоростях газожидкостного потока $C > 40 - 50$ m/s. Эти факторы делают заманчивым использовать свойства таких сред для применения в науке, народном хозяйстве, промышленности. Устройства и установки с использованием таких гетерогенных сред уже используются для создания экологической техники [3], при разработке новых видов топлива („активированного пористого топлива“) для решения проблем энергетики и авиации [4]. Следует отметить, что течения газожидкостных сред при $\varphi \geq 0.3$ обычно из пузырькового режима переходят

в снарядный и далее пленочный режим, что резко снижает площадь поверхности раздела фаз [1], поэтому исследование таких течений, их устойчивости, в том числе и при наличии УВ, представляет важную научно-техническую задачу. В работе [3] создавался пузырьковый режим течения при высоких значениях газосодержания. Для предотвращения коалесценции использовались следующие приемы: резкое ускорение потока в затопленных струях, турбулизация, ударно-волновая обработка, акустическое воздействие либо сочетание этих факторов. Отметим важный факт, что при параметрах газосодержания выше 30% пузырьковый режим переходит в снарядный или пленочный режимы даже при наличии поверхностно-активных веществ, если вышеуказанные факторы воздействия на поток исчезают. Также авторами работы [5] отмечается факт, что при числе Рейнольдса обтекания пузырьков менее 30 пузырьки не коалесцируют. Таким образом, можно утверждать, что технически возможно создать пузырьковое течение при газосодержании более 30%; и такие устройства уже созданы и внедрены на ряде производств. Отметим, что устройства и конструкции установок [3,4] создавались при отсутствии серьезной фундаментальной базы в теории структуры ударных волн в пузырьковых жидкостях, в частности эффектов поступательной неравновесности. Влияние эффектов поступательной неравновесности на процессы дробления пузырьков при $0.3 \leq \varphi \leq 0.98$ не исследовалось, а именно они определяют число Вебера дробления пузырьков за счет касательных напряжений:

$$We_{cr} = \tau / (2\sigma / r) = (P_{\parallel} - P_{\perp}) / (4\sigma / 3r), \quad (1.1)$$

где τ — касательные напряжения, σ — поверхностное натяжение, r — радиус пузырька, P_{\parallel} — продольное и P_{\perp} — поперечное давления. Понятие анизотропии давления и температур является обыденным для газов и газовых смесей и исследовалось давно [6]. Следует отметить, что в газах, газовых смесях и жидкостях характерным параметром толщины ударной волны является длина свободного пробега молекул или атомов λ [6,7], а в пузырьковых и микропористых жидкостях характерным размером, определяющим толщину фронта ударной волны, является средний диаметр пузырьков — d [8].

В основе описания структуры фронта ударной волны в пузырьковой среде использованы идеи Ландау и Тамма–Мотт–Смитта [6,7]. Они состоят в том, что каждая фаза среды делится на две „группы“, одной из них приписываются параметры фазы до ударной волны, другой —

параметры после [8]. Ранее для описания течений гетерогенных сред использовались уравнения многотемпературной, многоскоростной гидрогазодинамики [9,10], однако в них каждая фаза могла иметь только одну собственную (парциальную) скорость и температуру. Использование модели [6–8] позволяет более глубоко исследовать эффекты поступательной неравновесности, особенно для сильных ударных волн. В [8] каждой „группе“ приписывается парциальная объемная доля в потоке $\varphi_s^l, \varphi_\tau^l, \varphi_s^g, \varphi_\tau^g$ (индексы l и g обозначают жидкую и газовую фазу соответственно, s обозначает „группу“ с параметрами фазы до ударной волны, τ — „группу“ с параметрами фазы после УВ). Эти параметры являются переменными. Все остальные характеристики потока зависят от координаты только через эти параметры. В [8] приведена полная система уравнений для описания структуры ударной волны. Аналитическое решение для объемных содержаний „групп“ выглядит следующим образом [8]:

$$\begin{aligned}\varphi_s^l &= (1 - \varphi_I)/(1 + \exp(4X/\delta)), \\ \varphi_s^g &= \varphi_I \varphi_s^l / (1 - \varphi_I), \\ \varphi_\tau^g &= \varphi_{II} (\varphi_I - \varphi_s^g) / \varphi_I, \\ \varphi_\tau^l &= (1 - \varphi_{II})(1 - \varphi_I - \varphi_s^l) / (1 - \varphi_I),\end{aligned}$$

где X — координата вдоль ударной волны, δ — толщина ударной волны, определяемая по Прандтлю [11], индексы I и II характеризуют параметры течения до фронта и за фронтом УВ. Соотношение между средним диаметром пузырьков и толщиной ударной волны определяется из следующих выражений [8]:

$$d_{bab}/\delta = 0.25B(1 - \varphi_I), \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}B &= \left| \frac{4\sqrt{2}nM_I^2(1 - \varphi_{II})\Gamma_{11}}{\sqrt{3}\pi\varphi_I^{5/3}(1 - \varphi_I)^{4/3}} \right. \\ &\quad \left. \times (1 - C_{II}/C_I)^3 / \left(\frac{k_I - 3}{2(k_I - 1)} \left(\frac{\varphi_{II}P_{II}(1 - \varphi_I)}{\varphi_I P_I(1 - \varphi_{II})} - 1 \right) \right) \right|, \quad (2.2)\end{aligned}$$

где d_{bab} — средний диаметр пузырьков, M_I — число Маха в набегающем потоке, $P_{I,II}$ — давление до фронта и за фронтом УВ, $C_{I,II}$ — скорость до фронта и за фронтом УВ, $\varphi_{I,II}$ — объемное газосодержание до фронта и за фронтом УВ, k_I — показатель адиабаты,

$\Gamma_{11} \approx 1.12 \div 1.14$ — коэффициент взаимодействия фаз (определяется из эксперимента).

Для выражения средней плотности ρ и средней скорости U_0 среды получим:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_l(\varphi_s^l + \varphi_\tau^l) + \rho_1^g \varphi_s^g + \rho_{II}^g \varphi_\tau^g, \\ U_0 &= (\rho_l(\varphi_s^l C_I + \varphi_\tau^l C_{II}) + \rho_1^g \varphi_s^g C_I + \rho_{II}^g \varphi_\tau^g C_{II}) / \rho. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для определения продольного и поперечного давлений в пузырьковой жидкости, как и для газовой смеси [6,7], необходимо ввести диффузионные скорости компонент: $W_s^l = C_I - U_0$, $W_\tau^l = C_{II} - U_0$, $W_s^g = C_I - U_0$, $W_\tau^g = C_{II} - U_0$. С использованием данных соотношений выражения для поперечного P_\perp и продольного P_\parallel давлений и касательных напряжений продольных τ_\parallel и поперечных τ_\perp получим:

$$\begin{aligned} P_\parallel &= P_I(\varphi_s^g + \varphi_s^l) + P_{II}(\varphi_\tau^l + \varphi_\tau^g) + \rho_1^g \varphi_s^g (W_s^g)^2 \\ &+ \rho_{II}^g \varphi_\tau^g (W_\tau^g)^2 + \rho_l(\varphi_s^l (W_s^l)^2 + \varphi_\tau^l (W_\tau^l)^2), \\ P_\perp &= P_I(\varphi_s^g + \varphi_s^l) + P_{II}(\varphi_\tau^l + \varphi_\tau^g), \\ \tau_\parallel &= 2(P_\parallel - P_\perp)/3, \\ \tau_\perp &= (P_\parallel - P_\perp)/3. \end{aligned} \quad (3.2)$$

На рис. 1 показаны зависимости продольного, поперечного и полного давлений и касательных напряжений от безразмерной координаты X/δ . Из соотношений (2.1)–(2.2) следует, что характерным масштабом толщины ударной волны в газопузырьковой смеси при $0.3 \leq \varphi \leq 0.98$ является средний диаметр пузырьков. Подобные зависимости для P_\parallel , P_\perp наблюдаются в ударных волнах в газах и газовых смесях [6,7], где из-за сильной поступательной неравновесности растет отрыв продольного и поперечного давлений. В работе [2] отмечается, что давление в газожидкостной среде определяется давлением в газовой фазе, поэтому по аналогии с процессами в ударных волнах в газах можно ввести понятия продольной, поперечной и средней температур газовой фазы (с учетом допущения, что энтальпия жидкой фазы во фронте ударной волны не меняется [2]):

$$\begin{aligned} T_\parallel / T_l &= P_\parallel \rho_1^g \varphi_l^g / (P_I(\rho_1^g \varphi_s^g + \rho_{II}^g \varphi_\tau^g)), \\ T_\perp / T_l &= P_\perp \rho_1^g \varphi_l^g / (P_I(\rho_1^g \varphi_s^g + \rho_{II}^g \varphi_\tau^g)), \\ T &= (T_\parallel + 2T_\perp)/3. \end{aligned} \quad (3.3)$$

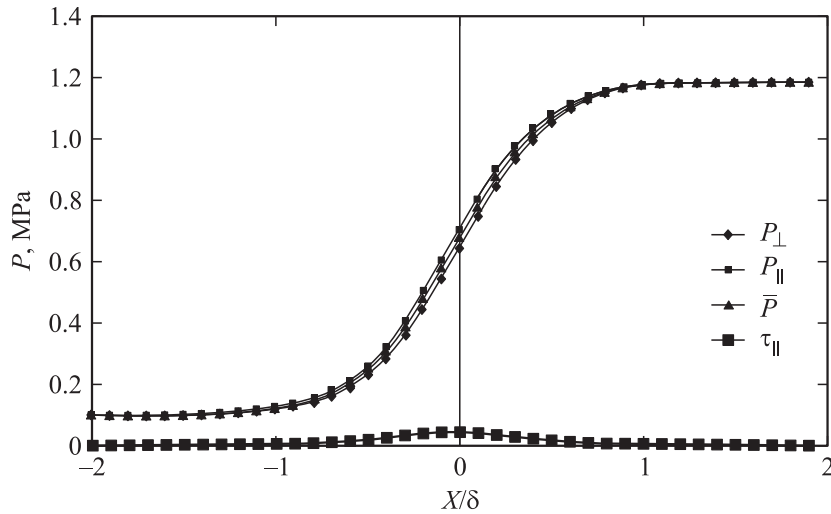


Рис. 1. Зависимость поперечного, продольного и среднего давлений и продольных касательных напряжений по толщине ударной волны. Газосодержание набегающего потока 0.5, статическое давление 1 atm, число Маха 4.22, плотность жидкой фазы 1000 kg/m^3 , плотность газа 1 kg/m^3 .

Введем безразмерную температуру в следующем общепринятом виде:

$$\bar{T} = (T - T_I)/(T_{II} - T_I), \quad (3.4)$$

где T_I , T_{II} — температура газовой фазы до фронта и за фронтом ударной волны (определяется из соотношений Ренкина–Гюгонно [2,8]). На рис. 2 показаны зависимости безразмерных продольной, поперечной и средней температур газовой фазы от безразмерной координаты при разных газосодержаниях. Видно, что при высоких газосодержаниях продольная температура может превышать температуру после ударной волны, при низких газосодержаниях такого не наблюдается. Анизотропия температур наблюдается в ударных волнах в газах и газовых смесях [6,7]. Для теплового потока по толщине ударной волны (с учетом допущения, что энтальпия жидкой фазы во фронте ударной волны не меняется [2]),

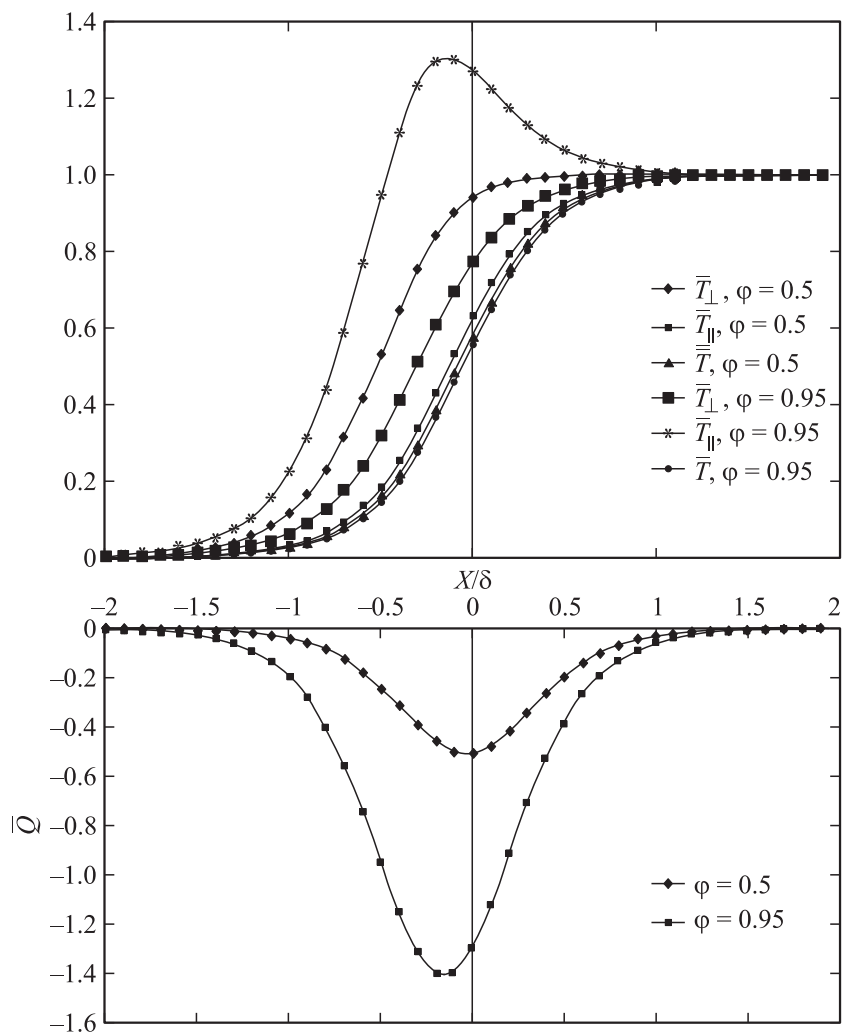


Рис. 2. Зависимости безразмерных температур и теплового потока от безразмерной координаты по толщине ударной волны. Газосодержание набегающего потока 0.5 и 0.95, статическое давление 1 atm, число Маха 4.22, плотность жидкой фазы 1000 kg/m^3 , плотность газа 1 kg/m^3 .

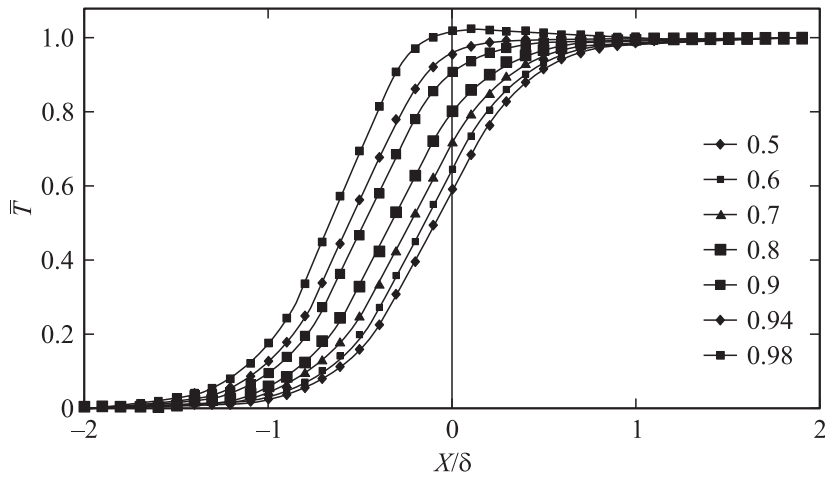


Рис. 3. Зависимость средней безразмерной температуры от безразмерной координаты по толщине ударной волны и газосодержания. Статическое давление набегающего потока 1 atm, число Маха 6.33, плотность жидкой фазы 1000 kg/m³, плотность газа 1 kg/m³.

получим выражение:

$$\bar{Q} = Q / (n_1^g k T_1 C_1 \phi_1^g \gamma / (\gamma - 1)),$$

$$\bar{Q} = \frac{W_s^g \phi_s^g}{C_1 \phi_1^g} + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{C_1^2 \phi_s^g W_s^{g3}}{a_g^2 \phi_1^g C_1^3} + \frac{\rho_{11}^g T_{11} W_\tau^g \phi_\tau^g}{\rho_1^g T_1 C_1 \phi_1^g} + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{\rho_{11}^g C_1^2 \phi_\tau^g W_\tau^{g3}}{\rho_1^g a_g^2 \phi_1^g C_1^3},$$

где $a_g = \sqrt{\gamma R T_1 / \mu}$ — скорость звука в газовой фазе, R — универсальная газовая постоянная, μ — молярная масса газа, k — константа Больцмана, γ — показатель адиабаты газа. На нижней части рис. 2 приведены зависимости теплового потока по толщине ударной волны. При этом при не очень высоких газосодержаниях тепловой поток симметричен относительно центра волны, при высоких газосодержаниях максимум теплового потока достигается раньше. На рис. 3 представлены профили температур газовой фазы во фронте ударной волны при различных газосодержаниях. При больших объемных газосодержаниях наблюдается превышение температуры во фронте над температурой за

фронтом. При этом тепловой поток знака не меняет. Это указывает, по аналогии с газовыми смесями [6], на нарушение закона Фика, так как дополнительно появляется перенос тепла за счет диффузии.

Таким образом, впервые теоретически исследованы эффекты поступательной неравновесности во фронте ударной волны в пузырьковой жидкости при $0.3 \leq \varphi \leq 0.98$. По аналогии со структурой ударной волны в газах и газовых смесях введены понятия: диффузионных скоростей, средней скорости, средней плотности, продольного и поперечного давления, вязких напряжений во фронте ударной волны. Для такой среды введены понятия температуры, продольной и поперечной температур, теплового потока по газовой фазе.

Приведены зависимости теплового потока, вязких напряжений, продольного и поперечного давления, продольной и поперечной температуры во фронте ударной волны при различных числах Маха и объемных газосодержаниях. Анализируется влияние этих параметров на характер поведения этих зависимостей во фронте ударной волны.

Введено понятие числа Вебера разрушения пузырьков, обусловленного эффектами анизотропии давления во фронте ударной волны, возникающими из-за поступательной неравновесности.

В заключение выносим благодарность рецензенту за внимательное прочтение рукописи, что способствовало значительному улучшению работы.

Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 459 с.
- [2] Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения. М.: Атомиздат, 1973. 444 с.
- [3] Великодный В.Ю., Беркова М.Д., Воротилин В.П., Гришин В.Г., Крыченко О.В., Попов В.В., Полотнюк О.Я., Рычагов Е.Н., Быков А.А., Добрынец Ю.В., Толкунов Б.Н. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 105–110.
- [4] Бушманов Е.А., Великодный В.Ю., Воротилин В.П., Яновский Ю.Г., Тимофеев И.Б., Д. Ван Ви // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 49–55.
- [5] Бошенятов Б.В. // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 3. С. 321–323.
- [6] Башлыков А.М., Великодный В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 5. С. 24–28.
- [7] Башлыков А.М., Великодный В.Ю. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 8. С. 33–42.

- [8] Бушманов Е.А., Великодный В.Ю., Воротилин В.П., Еремеев А.В., Тимофеев И.Б., Яновский Ю.Г., Д. Ван Ви. // III Международный симпозиум. Термохимические процессы в плазменной аэродинамике. (Труды конференции). Санкт-Петербург, 28–31 июля. 2003 г. С. 286–296.
- [9] Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука. Новосибирское отд-ние, 1984. 215 с.
- [10] Цибаров В.А. Кинетический метод в теории газозвесей. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1997. 191 с.
- [11] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.