

УДК 532.529:532.593 (575.2) (04)

К ВОПРОСУ О ВОЛНАХ ДАВЛЕНИЯ В ПАРОЖИДКОСТНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

А.Г. Кутушев – докт. физ.-мат. наук, профессор,

А.М. Мамытов – научн. сотрудник

В рамках модели двухтемпературной, двухдавленной, односкоростной, реагирующей дисперсной смеси осуществляется численное исследование динамики ударных волн в парожидкостной пузырьковой среде в зависимости от ее начального давления. Отмечается, что влияние начального давления смеси на поведение волн определяется процессом межфазного тепломассообмена.

Ключевые слова: ударная волна; пузырьковая жидкость; пар; начальное давление; тепломассообмен; численное исследование.

Парожидкостные пузырьковые среды широко используются в качестве двухфазных рабочих тел в различных энергетических установках, аппаратах химической технологии и криогенной техники, в нефтедобывающих скважинах и др. Безопасное и эффективное функционирование теплоэнергетических и технологических установок обуславливает возрастающий интерес к проблемам волновой динамики парожидкостных пузырьковых жидкостей. В частности, с практической точки зрения интересно установить основные закономерности распространения ударных волн в смесях жидкости с пузырьками пара (например, при анализе аварийной ситуации в технологической установке в условиях нештатного резкого повышения давления). К настоящему времени теоретическими и экспериментальными методами исследования установлены некоторые особенности протекания волновых процессов в парожидкостных пузырьковых средах [1÷3]. Вместе с тем, указанные особенности поведения ударных волн в парожидкостных пузырьковых средах изучены недостаточно детально. Пример исследования, связанного с конкретизацией межфазного тепломассообмена в пузырьковой жидкости при ее различных начальных давлениях, приведен в настоящей работе.

Основные уравнения. Для теоретического описания одномерного нестационарного движения парожидкостной пузырьковой жидкости используются допущения [3, 4]. Согласно им полагается, что несущая жидкость является несжимаемой идеальной средой, а пар в пузырьках есть идеальный калорически совершенный газ; пар в пузырьках находится на линии насы-

щения и подчиняется уравнению Клапейрона-Клаузиуса; эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия; скорость фазовых переходов в равновесном приближении определяется балансом энергии на межфазной границе; смесь односкоростная, двухдавленная и двухтемпературная (жидкость является термостатом, но в окрестности поверхности пузырьков её микротемпература подчиняется уравнению конвективной теплопроводности).

При сделанных допущениях замкнутая система уравнений движения фаз парожидкостной пузырьковой смеси в Лагранжевых переменных (x, t) имеет вид [3, 4]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial x} = 4(-1)^i \pi R^2 n_j,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (R^3 \rho_2^0) = 3R^2 j, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_i^0 \quad (i = 1, 2), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho = \rho_1 + \rho_2,$$

$$\alpha_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 n, \quad p = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 \left(p_2 - \frac{2\sigma}{R} \right),$$

$$\rho_1^0 = const, \quad \frac{dT_2}{dp_2} = \frac{T_2}{\rho_2^0 l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right), \quad p_2 = \rho_2^0 B T_2,$$

$$\rho_1^0 c_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right),$$

$$w_1 = w_{1R} \frac{R^2}{r^2},$$

$$\begin{aligned}
 r = R: \quad T_1 = T_2, \quad j_l = -q_{1R} - q_{2R}, \\
 q_{1R} = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=R}, \\
 q_{2R} = \frac{R}{3} \left[\frac{c_{p2} T_2}{l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) - 1 \right] \frac{\partial p_2}{\partial t}; \\
 r = R \alpha_2^{-1/3} : T_1 = T_0, \\
 (1 - \varphi_1) R \frac{\partial w_{1R}}{\partial t} + 1,5(1 - \varphi_2) w_{1R}^2 + \frac{4\nu_1}{R} w_{1R} = \\
 = \frac{1}{\rho_1^0} \left(p_2 - p_1 - \frac{2\sigma}{R} \right), \\
 \frac{\partial R}{\partial t} = w_{1R} + \frac{j}{\rho_1^0}, \quad \varphi_1 = 1,5 \frac{\alpha_2^{1/3} - \alpha_2}{1 - \alpha_2}, \\
 \varphi_2 = \frac{(2 + \alpha_2) \alpha_2^{1/3} - 3\alpha_2}{1 - \alpha_2}.
 \end{aligned}$$

Здесь $\rho_i^0, \rho_i, \alpha_i, p_i$ – истинная и приведенная плотности, объемное содержание и давление i -ой фазы (1 – жидкости, 2 – пузырьков); ρ_0, ρ, ν, v – средние начальная и текущая плотности, приведенное давление и массовая скорость смеси; n – число пузырьков в единице объема; R, w_{1R} – текущий радиус пузырька и радиальная скорость жидкости на межфазной границе; j – интенсивность фазовых превращений на межфазной поверхности; ν_1, σ, c_1, l – кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, удельные теплоемкость и теплота парообразования жидкости; B_2 – газовая постоянная; c_{p2} – удельная теплоемкость пара при постоянном давлении; T_2 – температура паровой фазы; r – радиальная Эйлера координата, отсчитываемая от центра пузырька; $T_1 = T_1(x, r, t)$ – температура жидкости вокруг пузырька; T_0 – температура жидкости вдали от поверхности пузырька; q_{iR} – тепловой поток от i -ой фазы к межфазной границе; φ_1 и φ_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие в уравнении Рэлея–Ламба неоднородность пузырьков.

Постановка задачи и некоторые результаты. Пусть в трубу, заполненную однородной термодинамически-равновесной монодисперсной пузырьковой смесью, вдвигается непроницаемый поршень, на поверхности которого поддерживается не зависящее от времени постоянное давление p_e . Требуется изучить влияние процессов межфазного тепломассообмена и начального статического давления в двухфазной

среде на эволюцию проходящей в ней ударной волны.

Начальные и граничные условия для сформулированной задачи имеют вид:

$$t = 0: p_1 = p_0, \quad p_2 = p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}, \quad R = R_0, \quad \alpha_2 = \alpha_{20},$$

$$T_1 = T_2 = T_0, \quad w_1 = v = 0.$$

$$x = 0: p = p_e = \text{const}, \quad x = \infty: p = p_0.$$

Система уравнений движения пузырьковой смеси с упомянутыми выше начальными и граничными условиями после приведения к безразмерному виду численно решалась посредством комбинации модифицированного метода Эйлера и метода прогонки [3, 5]. Не приводя, для краткости, систему безразмерных уравнений отметим, что она характеризуется следующими критериями подобия [3]:

$$S = \frac{2\sigma}{p_0 R_0}, \quad Re_1 = \frac{a^* R_0}{4\nu_1}, \quad Pe_1 = \frac{a^* R_0}{\kappa_1}, \quad \alpha_{20},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0}, \quad \gamma,$$

$$C_{2*} = \frac{BT_0}{l} = \frac{(\gamma - 1)c_{p2} T_0}{l}, \quad C_{1*} = \frac{c_1 T_0}{l},$$

$$Pe = \frac{Pe}{p_0} \left(a^* = \frac{p_0}{\rho_1^0} \right).$$

Здесь ν_1 и κ_1 соответственно коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности жидкой фазы; γ – показатель адиабаты пара; Re_1 и Pe_1 – числа Рейнольдса и Пекле жидкости.

Расчеты выполнялись для пароводяных смесей при $T_0=373$ К и $p_0=1$ бар, а также при $T_0=424$ К и $p_0=5$ бар. Значения термодинамических параметров пара и воды при указанных условиях приведены в таблице. Начальный радиус пузырька (R_0) полагался равным 1 мм. Исходное объемное содержание пара в смеси (α_{20}) принималось равным 0,05. Давление на поршне, инициирующее ударную волну (p_e), взято равным $1,4 p_0$.

В соответствии с выбранными начальными параметрами фаз пароводяной смеси при $p_0=1$ и 5 бар и давлением на поршне ($p_e=\text{const}$) два критерия подобия (α_{20} и Pe) являются постоянными величинами. Остальные критерии подобия ($S; Re_1; Pe_1; \varepsilon_0; \gamma; C_{1*}; C_{2*}$) являются переменными величинами. Для условий рассматриваемой задачи наиболее значимыми критериями подобия (т.е. наиболее чувствительными к изменению p_0) являются параметры Pe_1 и C_{1*}/ε_0 ,

Теплофизические свойства воды и водяного пара на линии насыщения [6]

p_0 , бар	T_0 , К	ρ_{10}^0 , кг/м ³	ρ_{20}^0 , кг/м ³	σ , Н/м	$\mu_1 \cdot 10^3$, Н·с/м ²	$\mu_2 \cdot 10^6$, Н·с/м ²
1	373	957.8	0.6	0.0589	0.279	12.1
5	424	915.7	2.62	0.048	0.181	13.9
p_0 , бар	γ	λ_{11} , Вт/(м·К)	λ_{22} , Вт/(м·К)	c_{11} , кДж/(кг·К)	c_{22} , кДж/(кг·К)	l , кДж/кг
1	1.28	0.680	0.0248	4.216	2.034	2258.2
5	1.24	0.686	0.030	4.31	2.32	2117.4

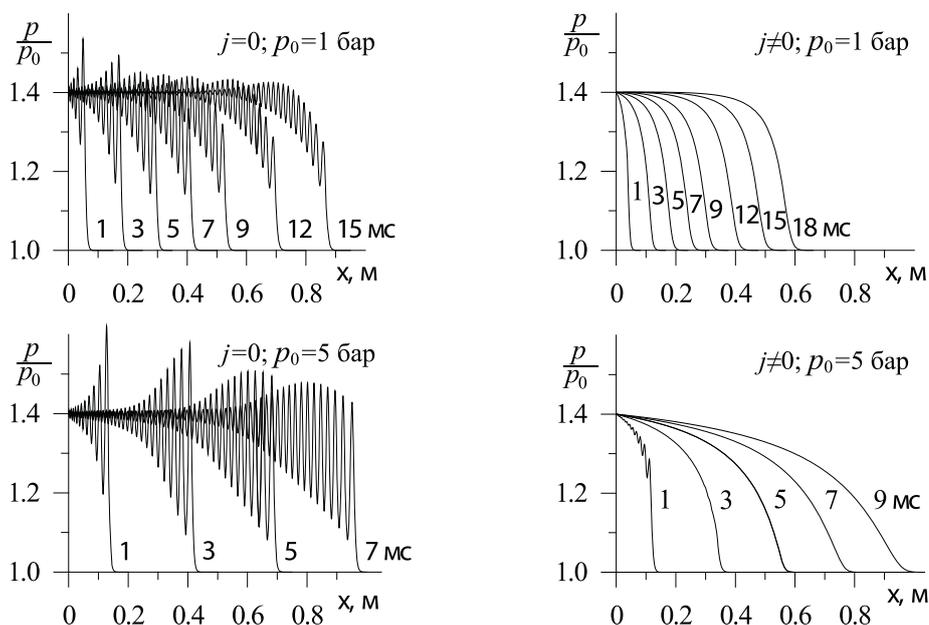


Рис. 1. Профили давления за нестационарными ударными волнами в газожидкостных ($j = 0$) и идентичных парожидкостных ($j \neq 0$) пузырьковых средах при двух начальных давлениях $p_0=1$ и 5 бар на ряд моментов времени.

которые определяются теплофизическими свойствами жидкости. Отметим, что согласно [3] $\varepsilon_0 = \rho_{20}^0 / \rho_1^0 \sim p_{20} / \rho_1^0 \sim p_0 / \rho_1^0$ ($\rho_1^0 = \text{const}$); $j \sim C_{1*} / \text{Re}_1$ и $j \sim A + BC_{1*} / \varepsilon_0$, где A и B – некоторые известные функции.

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты численного расчета. В левой колонке графиков показаны расчетные профили давления и радиуса пузырьков за ударной волной, распространяющейся по пузырьковой парожидкостной смеси с “замороженным” межфазным массообменом ($j = 0$) с начальным статическим давлением 1 и 5 бар. Данный пример расчета, при прочих одинаковых условиях, соответствует пузырьковой газожидкостной среде. Из рис. 1, 2

видно, что при отсутствии фазовых превращений с увеличением начального давления (p_0) в смеси наблюдается замедление межфазного теплообмена, приводящее к некоторому увеличению скорости распространения ударной волны. Кроме того, с ростом p_0 усиливается осцилляционный характер структуры ударной волны в пузырьковой смеси.

В правой колонке графиков изображены аналогичные результаты, соответствующие распространению ударной волны в парожидкостной пузырьковой смеси с межфазным массообменом ($j \neq 0$) и начальным давлением 1 и 5 бар. Как видно из приведенных расчетных данных, с ростом p_0 так же, как и в случае смеси с $j = 0$,

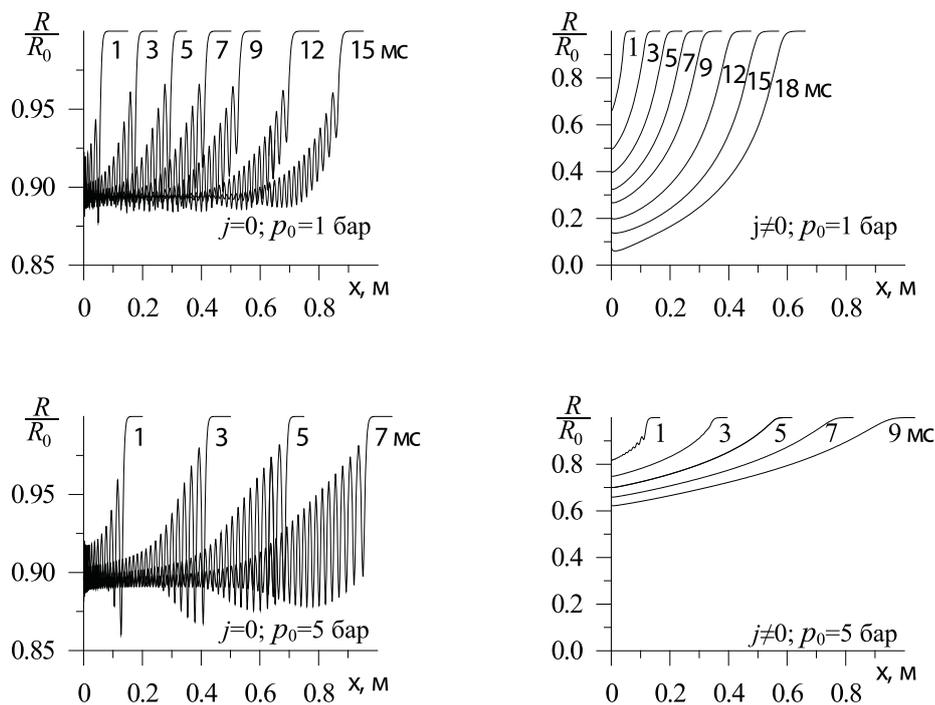


Рис. 2. Соответствующие рис.1 профили радиусов пузырьков за волнами давления в пузырьковых средах.

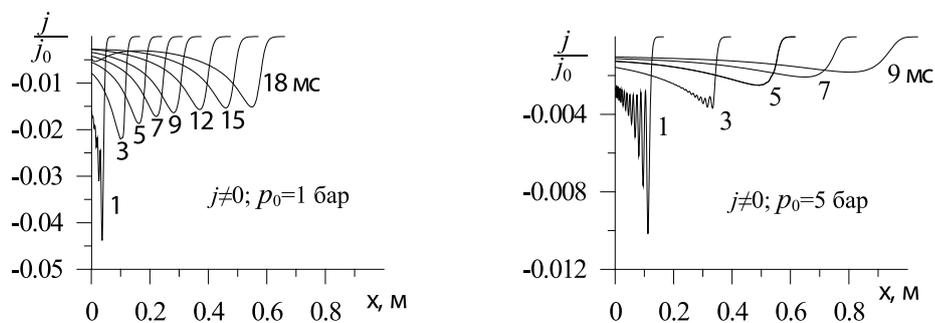


Рис. 3. Соответствующие рис. 1÷2 профили интенсивности фазовых превращений за волнами давления в кипящих парожидкостных средах при двух начальных давлениях. Значения масштаба обезразмеривания ($j_0 = \rho_{10}^0 \cdot \sqrt{p_0 / \rho_{10}^0}$) для $p_0=1$ и 5 бар соответственно равны 9787 и 9569 кг/(м²с).

имеет место увеличение скорости распространения ударной волны. При этом с ростом p_0 замедляется снижение радиуса и, соответственно, паросодержания в смеси. Отмеченные особенности поведения ударной волны и возмущенной смеси обусловлены процессом конденсации пара ($j < 0$) в пузырьках.

Как свидетельствуют данные численного исследования (см. рис. 3), интенсивность конденсации пара в пузырьках в смесях с большим давлением ($p_0=5$ бар) почти на порядок меньше аналогичной величины в смеси с меньшим давлением ($p_0=1$ бар). Данное обстоятельство связано с тем, что, согласно [3], интенсивность фазовых превращений в смеси (j) пропорциональна безразмерному параметру C_{1*}/ε_0 , в котором делимое C_{1*} зависит от теплофизических свойств несущей жидкой фазы, а делитель ε_0 – от относительной плотности фаз. Для ударных волн умеренной интенсивности $p_e/p_0 \sim 0.1$ величина $\varepsilon_0 \rightarrow 0$. Для $p_0=1$ и 5 бар значение $C_{1*} \approx const$, а относительная плотность фаз ($1/\varepsilon_0$) существенно зависит от начального давления смеси, так как $\rho_{20}^0 \sim p_0$.

Таким образом, посредством простых оценок и методов прямого численного моделирования физических процессов показано, что увеличение начального статического давления в парожидкостной пузырьковой среде приводит к снижению интенсивности фазовых превращений и уменьшению диссипативных процессов межфазного теплообмена. Показана определяющая роль величины относительной плотности фаз $\varepsilon_0 = \rho_{20}^0/\rho_1^0$ на динамику распространения ударных волн в парожидкостных пузырь-

ковых смесях в зависимости от их начального давления. Расчетным путем установлено, что влияние других теплофизических параметров пара и жидкости на динамику протекания волновых процессов в пузырьковых средах за волнами умеренной интенсивности является менее существенным, чем относительная плотность фаз.

Литература

1. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
2. Зьонг Нгок Хай, Нигматулин Р.И., Хабеев Н.С. Нестационарные волны в жидкости с пузырьками пара // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1984. – №5. – С. 117–125.
3. Nigmatulin R.I., Khabeev N.S., Zuong Ngok Hai. Waves in liquids with vapour bubbles // J. Fluid Mech. – 1988. – V. 186, January. – P. 85–117.
4. Кутушев А.Г., Мамытов А.М. Эволюция ударной волны в парожидкостной пузырьковой смеси под воздействием постоянного возмущающего давления поршня // Нефть и газ Западной Сибири: Мат-лы Всерос. научн.-техн. конф. Т. 3. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2007. – С. 154–157.
5. Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И. Нестационарные волны в жидкости с пузырьками газа // ДАН СССР. МЖГ. – 1976. – Т. 226. – №6. – С. 1299–1302.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.