

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ПАРОЖИДКОСТНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

МАМЫТОВ А. М.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им.

С.А.Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия

a.mamytov@mail.ru

INFLUENCE OF HEAT AND MASS TRANSFER ON THE PROPAGATION OF SHOCK WAVES IN VAPOR-LIQUID BUBBLY MEDIA MAMYTOV A. M.

Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,

Tyumen, Russia,

a.mamytov@mail.ru

Аннотация

В рамках двухтемпературной с двумя давлениями односкоростной модели проведено численное исследование динамики ударных волн в пароводяной пузырьковой среде и в жидком азоте с паровыми пузырьками. Показано, что волновая картина в смеси кипящей воды с пузырьками водяного пара должна приближаться к аналогичной картине в смеси жидкого азота с пузырьками пара азота при увеличении начального давления в пароводяной смеси.

Основные уравнения

Для теоретического описания одномерного нестационарного движения парожидкостной пузырьковой жидкости используются допущения [1, 3, 6]. Согласно им полагается, что несущая жидкость является несжимаемой идеальной средой, а пар в пузырьках есть идеальный газ, он находится на линии насыщения 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, описывающая динамику парожидкостной пузырьковой смеси, в лагранжевых переменных (x, t) имеет вид [1, 2, 3]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\rho \rho_i}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial x} = 4(-1)^i \pi R^2 n_j, \quad \frac{\partial}{\partial t} (R^3 \rho_2^0) = 3R^2 j, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \rho_i = \alpha_i \rho_i^0 \quad (i = 1, 2),$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho = \rho_1 + \rho_2, \quad \alpha_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 n,$$

$$p = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 \left(p_2 - \frac{2\sigma}{R} \right), \quad \rho_1^0 = const, \quad \frac{dT_2}{dp_2} = \frac{T_2}{\rho_2^0 l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right), \quad p_2 = \rho_2^0 B T_2,$$

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

$$r = R: \quad T_1 = T_2, \quad jl = -q_{1R} - q_{2R}, \quad q_{1R} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad q_{2R} = \frac{R}{3} \left[\frac{c_{p2} T_2}{l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) - 1 \right] \frac{\partial p_2}{\partial t};$$

$$r = R\alpha_2^{-1/3}: \quad T_1 = T_0,$$

$$(1 - \varphi_1)R \frac{\partial w_{1R}}{\partial t} + 1,5(1 - \varphi_2)w_{1R}^2 + \frac{4v_1}{R}w_{1R} = \frac{1}{\rho_1^0} \left(p_2 - p_1 - \frac{2\sigma}{R} \right), \quad \frac{\partial R}{\partial t} = w_{1R} + \frac{j}{\rho_1^0},$$

$$\varphi_1 = 1,5 \frac{\alpha_2^{1/3} - \alpha_2}{1 - \alpha_2}, \quad \varphi_2 = \frac{(2 + \alpha_2)\alpha_2^{1/3} - 3\alpha_2}{1 - \alpha_2}.$$

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, p, 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; v_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 -й фазы к межфазной границе; φ_1 и φ_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие в уравнении Рэлея-Ламба неоднородность пузырьков [1, 3, 6].

Начальные и граничные условия для данной задачи можно записать в виде:

$$t = 0: \quad p_1 = p_0, \quad p_2 = p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}, \quad R = R_0, \quad \alpha_2 = \alpha_{20}, \quad T_1 = T_2 = T_0, \quad w_1 = v = 0.$$

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

Результаты расчетов

Система уравнений движения пузырьковой смеси с начальными и граничными условиями после определенных преобразований численно решалась с помощью модифицированного метода Эйлера и метода прогонки [1, 3, 4, 5].

Расчеты выполнялись для пароводяных смесей с $R_0=1$ мм, $\alpha_{20}=0.05$, $T_0=T_s(p_0)=453$ К при $p_0=1.0$ МПа и жидкого азота с паровыми пузырьками ($R_0=1$ мм, $\alpha_{20}=0.05$, $T_0=T_s(p_0)=77,35$ при $p_0=0.1$ МПа. Давление p_e на поршне бралось равным $1.4 p_0$.

Таблица 1. Теплофизические свойства воды и водяного пара и жидкого азота с пузырьками пара азота на линии насыщения [8]

p_0 , МПа	T_0 , К	ρ_{10}^0 , кг/м ³	ρ_{20}^0 , кг/м ³	σ , Н/м	$\mu_1 \cdot 10^3$, Н·сек/м ²	$\mu_2 \cdot 10^6$, Н·сек/м ²
1(вода)	453	886.9	5.16	42.2	0.149	14.9
0,1(азот)	77.35	807.1	4.61	8.8	0.168	-
p_0 , МПа	γ	λ_1 , Вт/(м·К)	$\lambda_2 \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	c_1 , кДж/(кг·К)	c_2 , кДж/(кг·К)	l , кДж/кг
1(вода)	1.20	0.676	34.1	4.408	2.615	2014.0
0,1(азот)	1.32	0.093	-	1.955	1.151	197.6

Основные безразмерные критерии при моделировании волновых процессов в

парожидкостных средах пузырьковой структуры:

$$S = 2\sigma/p_0 R_0, \quad Re_r = C^* R_0 / 4\nu_1, \quad Pe_1 = C^* R_0 / \nu_1^T, \quad \alpha_{20}, \varepsilon_0 = \rho_{20}^0 / \rho_1^0, \quad \gamma, \\ C_{2*} = BT_0/l = ((\gamma - 1)/\gamma)c_{p2}T_0/l, \quad C_{1*} = c_{p1}T_0/l, \quad P_e = p_e/p_0 \quad (C^{*2} = p_0/\rho_1^0).$$

В случае смеси жидкости с пузырьками пара при состояниях, далеких от критических, когда $\varepsilon_0 \ll 1$, влияние этого малого параметра на динамику волн можно выразить в комбинации с C_{1*} , а именно C_{1*}/ε_0 . Связано это с тем, что малый параметр ε_0 определяет степень уменьшения (роста) пузырька при конденсации (испарении) заданной массы вещества. Отношение ρ_2^0/ρ_1^0 входит в число Якоба $Ja = C\Delta T/l\varepsilon_0$, широко используемое в теплофизике пузырьков, и параметр $C_{1*}/\varepsilon_0 = C_1T_0/l\varepsilon_0$, подобно числу Якоба, существенно влияет на динамику волн в парожидкостных пузырьковых средах. В этом случае основными критериями являются $\varepsilon_0, \gamma, C_{2*}, C_{1*}/\varepsilon_0, Pe_1$ [2, 3].

Таблица 2. Значения основных критериев для пароводяной пузырьковой среды и для жидкого азота с паровыми пузырьками

Паро-жидкостная пузырьковая система	p_0 , МПа	T_s , К	R_0 , мм	$10^3 \cdot \varepsilon_0$	C_{1*}	γ	C_{2*}	C_{1*}/ε_0	$10^{-5} \cdot Pe_1$
Вода	1,0	453	1	5,8	0,99	1,20	0,096	171	1,94
Азот	0,1	77,35	1	5,7	0,76	1,32	0,086	133	1,89

Видно, что параметры γ, C_{2*} , выражающие влияние на динамику волн теплофизических свойств пара, мало отличаются для этих сред. Поэтому вместе с α_{20} и ΔP_e , характеризующими объемное содержание включений и нелинейные свойства процесса, основными критериями подобия являются C_{1*}/ε_0 и Pe_1 , которые определяются теплофизическими свойствами жидкости, а не пара. При этом очень легко изменяющийся за счет изменения начального давления системы P_0 параметр ε_0 вносит существенный вклад в изменение комбинации C_{1*}/ε_0 . Эти критерии подобия позволяют использовать пароводяные смеси для моделирования течений других парожидкостных систем, прямые эксперименты с которыми невозможны или дорогостоящи [2, 3].

Из табл. 2 также видно, что волновая картина в смеси кипящей воды с пузырьками водяного пара должна приближаться к аналогичной картине в смеси жидкого азота с пузырьками пара азота при увеличении начального давления в пароводяной смеси.

Заметим, что интенсивность фазовых превращений в смеси j пропорциональна безразмерной величине $(c_{p1}T_0/l) \cdot (\rho_1^0/\rho_{20}^0)$ [2]. При изменении p_0 в диапазоне 0.1 - 1.0 МПа значение $c_{p1}T_0/l \approx const$, а относительная плотность фаз $\varepsilon_0 = \rho_{20}^0/\rho_1^0$ зависит от начального давления ($\rho_{20}^0 \sim p_0, \rho_1^0 = const$). Таким образом, j обратно пропорциональна p_0 .

Увеличение ε_0 и Pe_1 (одновременно это приводит к уменьшению значения комбинации C_{1*}/ε_0) означает увеличение массы пара в пузырьках и замедление процесса межфазного теплообмена. Это приводит к увеличению времени и расстояния выхода волн на предельную стационарную конфигурацию, к увеличению толщины волн, к усилению тенденции к осцилляциям в волне, которые характерны для случая распространения волн в жидкости с пузырьками нерастворимого и неконденсирующегося газа. В отличие от смеси

жидкости с пузырьками газа, для которой процесс нестационарного межфазного теплообмена определяется одним основным критерием подобия Pe_2 , в смеси жидкости с пузырьками пара этот процесс определяется в основном через два безразмерных параметра C_{1*}/ε_0 и Pe_1 [3].

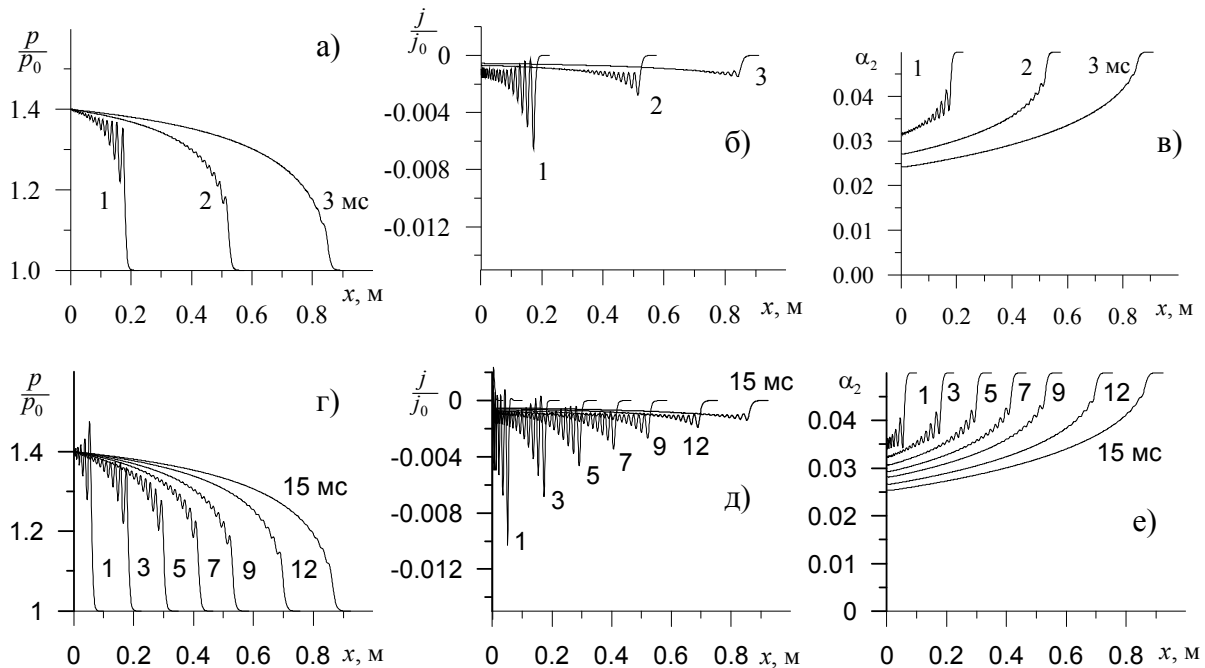


Рис. 1. Профили давления, интенсивности конденсации и объемного газосодержания в ударных волнах в пароводяной пузырьковой среде при начальном давлении $p_0 = 1$ МПа (графики: а, б, в,) и в жидком азоте с паровыми пузырьками при начальном давлении $p_0 = 0.1$ МПа (г, д, е) в различные моменты времени.

Сравнение главных теплофизических безразмерных параметров показывает, что для случая пароводяной пузырьковой среды при $p_0 = 1$ МПа и в жидком азоте с паровыми пузырьками при начальном давлении $p_0 = 0.1$ МПа эти критериальные числа имеют близкие значения. То есть для этих случаев эволюция ударной волны в пароводяной пузырьковой среде и в жидком азоте с паровыми пузырьками при одинаковых $R_0 = 1$ мм, $\alpha_{20} = 0.05$, давлении p_e на поршне имеет подобный характер, что подтверждается выполненными расчетами. При сравнении конфигурации волн необходимо учесть, что величина скорости $C^* = \sqrt{p_0/\rho}$ для пароводяной пузырьковой среды составляет 33,6 м/с, а для жидкого азота с паровыми пузырьками $C^* \approx 11$ м/с.

Заключение

Анализ и сравнение главных теплофизических безразмерных параметров и соответствующих расчетов показывает, что волновая картина в смеси кипящей воды с пузырьками водяного пара должна приближаться к аналогичной картине в смеси жидкого азота с пузырьками пара азота при увеличении начального давления в пароводяной смеси. Для случая пароводяной пузырьковой среды при $p_0 = 1$ МПа и в жидком азоте с паровыми пузырьками при начальном давлении $p_0 = 0.1$ МПа критерии подобия имеют близкие значения. Поэтому в этих случаях профили параметров ударной волны в пароводяной пузырьковой среде и в жидком азоте с паровыми пузырьками при одинаковых $R_0 = 1$ мм, $\alpha_{20} = 0.05$, давлении p_e на поршне подобны.

Литература

1. *Зыонг Нгок Хай, Нигматулин Р.И., Хабеев Н.С.* Нестационарные волны в жидкости с пузырьками пара // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 5. С. 117 – 125.
2. *Nigmatulin R.I., Khabeev N.S., Zuong Ngok Hai.* Waves in liquids with vapour bubbles // J. Fluid Mech. 1988. V.186. P. 85 – 117.
3. *Зыонг Нгок Хай, Мусаев Н. Д, Мамытов А.* Усиление ударных волн в пузырьковых жидкостях . – М.: НИИ мех. МГУ.1988. Отчет №3609.91с.
4. *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.
5. *Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И.* Исследование нестационарных ударных волн в газожидкостных смесях пузырьковой структуры //ПМТФ. 1978. –№ 2. – С. 78-86.
6. *Кутушев А.Г., Мамытов А. М.* К вопросу о волнах давления в парожидкостных пузырьковых средах // Вестник Кыргызско – Российского Славянского университета. 2009. Т. 9. №11. С. 165 – 169.
7. *Губайдуллин А.А., Мамытов А.* Эволюция ударной волны в парожидкостной пузырьковой среде при высоком статическом давлении// Тезисы докладов российской конференции «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», посвященной 70-летию академика Р.И. Нигматулина. – Уфа, 2010. С. 37 – 38.
8. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. 720 с.