

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНОГО МАССООБМЕНА НА ОТРАЖЕНИЕ
ОТ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПАРОВОДЯНОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЕ

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,

Тюменский филиал ИТПМ СО РАН им. С.А. Христиановича, Россия, г. Тюмень

В работах [1–3] приводятся результаты численного исследования закономерностей формирования волн давления умеренной интенсивности в парожидкостных пузырьковых средах. В [4,5] детально анализируется влияние процессов межфазного теплообмена на динамику ударно-волнового движения однокомпонентных смесей жидкостей с паровыми пузырьками. В [6] осуществляется численное исследование процессов распространения и отражения от свободной поверхности волн разрежения в парожидкостных пузырьковых системах. В данной работе, являющейся логическим продолжением [1–6], сообщаются результаты численного исследования процесса межфазного массообмена на особенности формирования и последующего отражения от свободной границы слабой ударной волны ступенчатого вида.

Основные допущения. Пусть имеется двухфазная однокомпонентная смесь жидкости с пузырьками пара. Для описания движения такой смеси используются традиционные для механики сплошных многофазных дисперсных сред главные предположения [1–3]: размеры пузырьков многократно превышают молекулярно-кинетические масштабы; расстояния, на которых макроскопические параметры смеси или фаз меняются существенно (вне поверхностей ударных волн), много больше размеров пузырьков.

Дополнительно принимаются следующие предположения: пузырьки сферические и монодисперсные; отсутствуют процессы дробления, столкновения, коагуляции и зарождения пузырьков; скорости макроскопического движения фаз совпадают; несущая фаза представляет собой идеальную несжимаемую жидкость, макроскопическая температура которой остается постоянной величиной во все моменты движения; дисперсная фаза описывается моделью идеального калорически-совершенного газа; эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия; теплофизические свойства фаз не зависят от температуры и давления; внешние массовые силы пренебрежимо малы.

Для корректного описания динамического, теплового и массового взаимодействия жидкости с пузырьками пара привлекаются следующие допущения: для радиального движения пузырьков справедливо обобщенное уравнение Рэлея-Ламба; давление, плотность и температура внутри пузырьков однородны и удовлетворяют уравнению Клапейрона-Клаузиуса для пара, находящегося на линии насыщения; интенсивность межфазного массообмена (конденсации пара или испарения жидкости) определяется разностью тепловых потоков на поверхности пузырьков со стороны паровой и жидкой фаз; поле температуры вокруг пузырьков, необходимое для нахождения потока тепла к межфазной поверхности со стороны жидкой фазы – сферически-симметричное.

Замкнутая система уравнений движения фаз парожидкостной

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

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

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

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

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

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

$$r = R : \quad T_1 = T_2, \quad jl = -q_{1R} - q_{2R}, \quad q_{1R} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R},$$

$$q_{2R} = \frac{R}{3} \left[\frac{c_{p2} T_2}{l} \left(1 - \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} \right) - 1 \right] \frac{\partial p_2}{\partial t},$$

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

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

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 ($j > 0$ – испарение жидкости; $j < 0$ – конденсация пара); 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_{1R} – 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. Пусть имеется вертикальная труба. В нижней части этой трубы расположен непроницаемый поршень. Над поршнем в трубе находится слой равновесной парожидкостной пузырьковой смеси высотой $x = h$ и с давлением P_0 . Пространство над слоем двухфазной пузырьковой смеси заполнено атмосферным газом ($P = P_0$). В начальный момент времени $t = 0$, поршень с лагранжевой координатой $x = 0$ вдвигается вверх таким образом, что давление на нём (P^e) при всех $t > 0$ остается постоянным ($P^e > P_0$). Требуется изучить процесс формирования и последующего отражения от свободной поверхности ударной волны в парожидкостной пузырьковой смеси.

Начальные и граничные условия для сформулированной задачи имеют вид:

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

$$T_1 = T_2 = T_0; \quad w_1 = v = 0 \quad (0 < x < h)$$

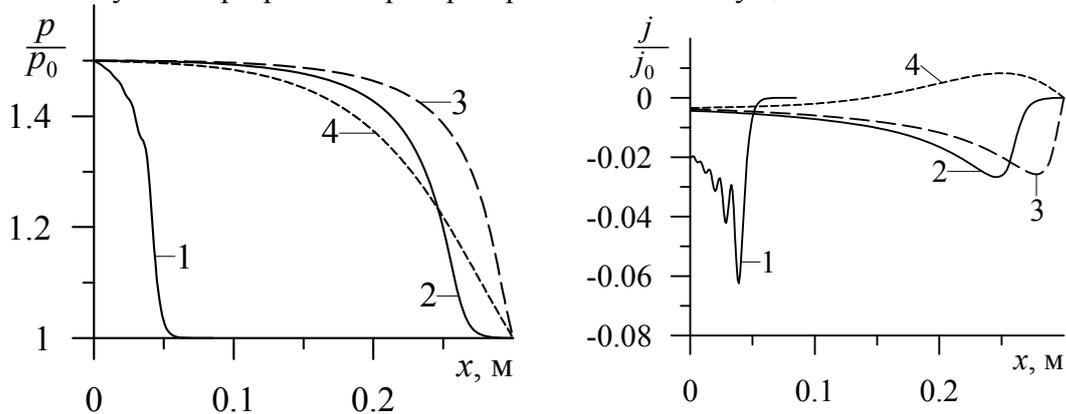
$$x = 0: \quad p = p_e = \text{const}, \quad x = h: \quad p = p_0$$

Численное интегрирование уравнений движения пузырьковой смеси с упомянутыми выше начальными и граничными условиями осуществлялось методами Эйлера-Коши и прогонки [1, 7], посредством вычислительной программы, написанной на алгоритмическом языке «Фортран». Контроль точности осуществлялся путем пересчета на более мелких сетках.

Расчеты выполнялись для пароводяных смесей при $T_0=373$ К и $p_0=1$ бар, $\rho_1^0 = 958 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{20}^0 = 0.0589 \text{ кг/м}^3$; $v_1 = 2.91 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $c_1 = 4216 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$; $\lambda_1 = 0.68 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $l = 2257.2 \text{ кДж/кг}$. Указанные значения термодинамических параметров пара и воды при указанных условиях приведены согласно [8]. Начальный радиус пузырьков полагался равным 1 мм. Исходное объемное содержание пара в смеси принималось равным 0.05. Давление на поршне, инициирующее ударную волну, взято равным 1,5 бар. Высота столба смеси $h = 0.3 \text{ м}$.

Некоторые результаты. На рис. 1 приведены расчетные профили приведенного давления смеси (p/p_0), интенсивности фазовых превращений (j/j_0), объемного содержания (α_2) и радиуса паровых пузырьков (R/R_0) на моменты времени $t = 1; 7; 8$ и 9.5 мс. Кривые 1 соответствуют волне давления, формирующейся перед движущимся поршнем, кривые 2 – началу взаимодействия набегающей ударной волны со свободной поверхностью. Кривые 3 и 4 соответствуют образующейся волне разрежения в пузырьковой среде.

Из представленных данных видно, что за сформированной перед поршнем ударной волной, вследствие конденсации пара ($j/j_0 < 0$), происходит постепенное исчезновение пузырьков. При этом двухфазная смесь перед поршнем становится практически однофазной жидкостью ($\alpha_2 \rightarrow 0$). Характерное время прохождения волны давления по слою жидкости до ее верхней границы ($x = h$) составляет величину ~ 7 мс. При отражении ударной волны от свободной границы наблюдается испарение жидкости в пузырьки ($j/j_0 > 0$), благодаря чему, объемное паросодержание в смеси снова увеличивается. Поскольку волна разрежения распространяется по возмущенной



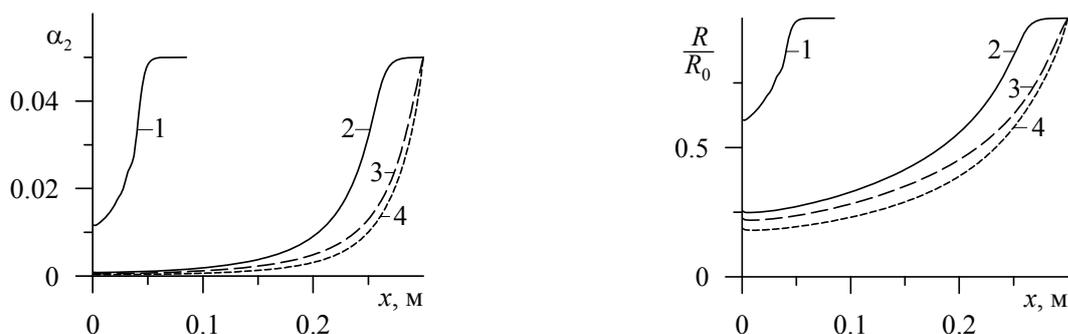


Рис. 1. Эпюры давления смеси, интенсивности фазовых превращений, объемного паросодержания и текущего радиуса пузырьков на ряд моментов времени.

парожидкостной среде, с уменьшающимся объемным содержанием пузырьков, то ее скорость заметно возрастает в направлении поршня. Из рис. 1 видно (см. кривые 3 и 4), что за характерное время ~ 1.5 мс волна разрежения проходит расстояние от свободной границы приблизительно равное $2/3$ высоты слоя. Столь быстрое распространение волны разрежения по слою пузырьковой среды связано с весьма заметным увеличением скорости звука в смеси из-за уменьшения объемного содержания паровой фазы.

Таким образом, в результате численного исследования установлено, что на процессы формирования ударной волны и ее последующего отражения от свободной поверхности сильное влияние оказывает межфазный массообмен (конденсация пара в волне сжатия и испарение жидкости в волне разрежения).

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т.1. – М.: Наука, 1987. – 464с.
4. Кутушев А.Г., Мамытов А. Численное исследование влияния межфазного теплообмена на распространение ударных волн в парожидкостных пузырьковых средах //Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2007. – Т.7, №6. – С.99-103.
5. Кутушев А.Г., Мамытов А.М. Эволюция ударной волны в парожидкостной пузырьковой смеси под воздействием постоянного возмущающего давления поршня // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы всероссийской научно- технической конференции. Т.3.– Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2007. –С. 154–157.
6. Кутушев А.Г., Губайдуллин А.А., Мамытов А. Математическое моделирование волны разрежения в пароводяной пузырьковой смеси за выдвигаемым поршнем //Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» /Под общ. ред. А.Ф. Шаповала и А.Г. Кутушева – Тюмень: 2008. – С.153-157.
7. 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.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972.– 720 с.