

УДК 532.529

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЖИДКОСТИ С ГИДРООБРАЗУЮЩИМ ГАЗОМ

Дайшкалиев Сержан Жолдасович

daishkaliyevs@gmail.com

Магистрант 2-го курса, Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева, механико-математического факультета, кафедра механика
Научный руководитель – Н.Ж.Джайчибеков

Жидкость с пузырьками газа имеет свойства, которые кардинально отличаются от чистой жидкости. Особенность пузырьковых жидкостей обусловлена их высокой статической сжимаемостью при сохранении высокой массовой плотности, близкой к плотности жидкости, что в свою очередь приводит к малой равновесной скорости звука.

При динамических процессах в пузырьковой жидкости начинают проявляться явления инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков. По этой причине ударные волны могут иметь осцилляционную структуру [1–3]. В таких средах могут формироваться уединенные волны, может происходить расслоение возмущений на высокочастотные (упругий предвестник) и на низкочастотные [4–6], а также могут появляться аномально высокие всплески давления при распространении волн сжатия в парожидкостных смесях. Распространение волн в жидкостях с пузырьками, пенах, а также в парогазокапельных смесях, которые содержат взвешенную фазу, сопровождается обычно тепловой диссипацией, поэтому важен учет межфазных теплообменных процессов [7, 8].

Исследование распространения акустических волн в пузырьковых жидкостях, содержащих гидратообразующий газ, позволяет на основе акустических методов определить наличие данного процесса в системе, его интенсивность, а также позволит более детально изучить параметры, определяющие фазовый переход газа в гидратное состояние. Рассматривается смесь жидкости с пузырьками гидратообразующего газа. Данная система находится при равновесных условиях гидратообразования. Смесь является монодисперсной, то есть в каждом элементарном объеме все пузырьки сферические и одинакового радиуса. В данной газожидкостной смеси происходит распространение малых возмущений, сопровождаемое фазовым переходом газа в гидратное состояние. Система макроскопических уравнений масс, числа пузырьков при отсутствии их дробления и импульсов в односкоростном приближении при учете, что движение жидкости с пузырьками представляет собой малые возмущения некоторого известного состояния равновесия, в линеаризованном виде запишется как:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v}{\partial x} &= -J_l, & \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \rho_{g0} \frac{\partial v}{\partial x} &= -J_g, \\ \frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \rho_{h0} \frac{\partial v}{\partial x} &= J_g + J_l, & & (1) \\ \frac{\partial n}{\partial t} + n_0 \frac{\partial v}{\partial x} &= 0, & \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial \rho_l}{\partial x}. \end{aligned}$$

Здесь $i = l, g, h$ - индексы, относящиеся к жидкости, газу и гидрату, $\rho_i, \rho_i^0, \alpha_i, j_i, p, v, a, n$ - соответственно средняя по смеси и по фазе плотности, объемное содержание фаз, интенсивность массопереноса, отнесенная на единицу площади поверхности пузырьков, давление, скорость, радиус пузырьков, число пузырьков в единице объема. В дальнейшем дополнительным индексом (0) внизу снабжены параметры, соответствующие

невозмущенному состоянию. Поскольку обычно $\rho_{g0}^0 \alpha_{g0} \ll \rho_{l0}^0 \alpha_{l0}$, то в дальнейшем будем полагать $\rho_0 = \rho_{l0}^0 \alpha_{l0}$.

Уравнение теплопроводности для жидкости и газа имеют вид:

$$\rho_{l0}^0 c_l \frac{\partial T_l'}{\partial t} = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_l r^2 \frac{\partial T_l'}{\partial r} \right) \quad (r > a_0)$$

(2)

$$\rho_{g0}^0 c_{pg} \frac{\partial T_g'}{\partial t} = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T_g'}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_g}{\partial t} \quad (r < a_0).$$

Уравнение пульсационного движения пузырьков после линеаризации в случае пренебрежения поверхностным натяжением примет вид:

$$a_0 \frac{\partial \omega_R}{\partial t} + 4v_l \frac{\omega_R}{a_0} = \frac{p_g - p_l}{\rho_{l0}^0},$$

На поверхности раздела фаз записывается уравнение теплового баланса

$$-\lambda_l \left(\frac{\partial T_l'}{\partial r} \right)_a + \lambda_g \left(\frac{\partial T_g'}{\partial r} \right)_a = j_h l_h$$

где l_h - удельная теплота образования гидрата, отнесенная на единицу его массы. Распределение температур вокруг пузырька и в газе определяем из уравнений теплопроводности (2). Так же на поверхности раздела фаз ($r = a_0$) задаются следующие граничные условия для системы (2)

$$T_g' = T_l' = T_a', \quad \frac{\partial a}{\partial t} = \omega_l = \omega_g = \omega$$

Кроме того,

$$\frac{\partial T_g'}{\partial r} = 0 \quad (r = 0), \quad T_l' = 0 \quad (r = \infty).$$

Уравнение для давления в газе p_g в линеаризованном виде имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -\frac{3\gamma p_0}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{3(\gamma - 1)}{a_0} \lambda_g \left(\frac{\partial T_g'}{\partial r} \right)_a + \frac{3(\gamma - 1)}{a_0} c_{gv} T_0 j_g.$$

Величина интенсивности фазового перехода газа в гидрат задается согласно [9]:

$$j_g = \frac{\beta(p_s - p_g)}{\sqrt{2\pi R_g T_0}},$$

где равновесное давление гидратообразования определяется из выражении

$$p_s(T_a) = p_{s0} \exp\left(\frac{T_a - T_0}{T_*}\right).$$

Здесь β — коэффициента аккомодации [10]. Из уравнения масс (1) с учетом кинематических зависимостей, а также уравнения состояния жидкости можно получить:

$$\frac{\alpha_{l0}}{C_l^2} \frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0}^0 \frac{\partial v}{\partial x} - 3\rho_{l0}^0 \frac{\alpha_{g0}}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} = 0.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Декснис Б.К. Распространение умеренно сильных ударных волн в двухфазной среде // Изв. АН Латв. ССР. Серия физических и технических наук. 1978. № 1. С. 75–81.
2. Crespo A. Sound and shock waves in liquids containing bubbles // Phis. Fluids. 1969. Vol. 12. № 11. P. 2274–2282.
3. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Галимзянов М.Н. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьковые зоны // Доклады Академии Наук. 2001. Т. 378. № 6. С. 763–768.
4. Кедринский В.К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // Прикладная механика и техническая физика. 1968. № 4. С. 29–34.

5. Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Галимзянов М.Н. Двумерные волны давления в жидкости, со- держащей пузырьки // Механика жидкости и газа. 2002. № 2. С. 139–147.
6. Галимзянов М.Н. Распространение волн сжатия в пузырьковых зонах конечных размеров // Вест- ник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. Вып. 2. С. 57– 66.
7. Айдагулов Р.Р., Хабеев Н.С., Шагапов В.Ш. Структура ударной волны в жидкости с пузырьками газа с учетом нестационарного межфазного теплообмена // Прикладная механика и техническая физика. 1977. № 3.С. 67-74.
8. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новоси- бирск: Наука, 1984. 301 с.
9. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
10. Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Чиглинцев И.А. Распространение волн сжатия в пузырьковой жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 247–260