

УДК 536.37:538.56

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ НАГРЕВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2011 г.

И.Л. Хабибуллин, А.Т. Хамитов, Ф.Ф. Назмутдинов

Башкирский госуниверситет, Уфа

Habibi.bsu@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследована динамика фазовых превращений в пористых средах, инициируемых нагревом электромагнитным излучением. Рассматриваются модели фазовых превращений в режиме просветления, сущность которого заключается в том, что вновь образуемая фаза практически не поглощает электромагнитное излучение. Приведены результаты аналитического и численного решений уравнений теплопереноса в пористой среде при наличии диссипации энергии электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, нагрев, просветление, теплоперенос, фазовый переход, пористая среда.

В режиме просветления среды, когда показатели поглощения излучения газом и матрицей пористой среды намного меньше показателя поглощения конденсированной фазой α_l , система уравнений, описывающая объемный фазовый переход в одномерном случае, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} [m(\rho_g S_g + \rho_l S_l)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$v_g = - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + m \alpha_l S_l q + m \rho_l L \frac{\partial S_l}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + m \alpha_l S_l q = 0, \quad P = \rho_g R T, \quad (3)$$

$$T = \varphi(P), \quad S_l + S_g = 1.$$

Эта система включает уравнения неразрывности и фильтрации газа (1) (конденсированная фаза является неподвижной), уравнения теплопроводности (2), уравнение Бугера–Ламберга–Бера, описывающее изменение интенсивности q электромагнитного излучения, уравнения состояния и фазового равновесия (3).

В (1)–(3) обозначено: T – температура, S – насыщенность фазы, m – пористость, k_g – проницаемость пористой среды для газа; $\rho_g c_g$, μ_g , ρ_g – объемная теплоемкость, вязкость и плотность газовой фазы; $\rho_l L$ – объемная теплота фазового перехода конденсированной среды.

В большинстве случаев при реальных значе-

ниях физических параметров в (1) можно пренебречь теплопроводным и конвективным потоками тепла по сравнению с интенсивностью объемного тепловыделения, а в (1) имеет место неравенство $\rho_g \ll \rho_l$. Тогда в адиабатическом приближении, когда выделяемое при электромагнитном нагреве тепло полностью расходуется на фазовое превращение, система (1)–(3) упрощается и допускает аналитическое решение, которое в безразмерных параметрах

$$\bar{S}_l = \frac{S_l}{S_{l0}}, \quad \bar{q} = \frac{q}{q_0}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}, \quad z = \frac{x}{h_0},$$

$$t_0 = \frac{\rho_l L}{\alpha_l q_0}, \quad \bar{P} = \frac{P}{P_0}, \quad h_0 = \frac{1}{m \alpha_l S_{l0}}$$

имеет вид

$$\bar{S}_l = [1 + e^{\tau - z} - e^{-z}]^{-1}, \quad \bar{q} = [1 + e^{z - \tau} - e^{-\tau}]^{-1}, \quad (4)$$

$$\bar{P}^2 = \frac{\pi_6}{1 - e^{-\tau}} \ln[e^z + e^\tau - 1] + C_1 z + C_2. \quad (5)$$

Здесь S_{l0} – начальная насыщенность конденсированной фазы, q_0 – интенсивность электромагнитного излучения на линии $x = 0$.

Безразмерный параметр π , определяющий давление образуемой газовой фазы, представляет собой отношение двух характерных значений интенсивностей притока массы газа: за счет фазового превращения конденсированной фазы ρ_l/τ_1 и за счет фильтрации $\bar{\rho}_g/\tau_2$, где τ_1 и τ_2 – характерные времена фазового перехода и релаксации давления:

$$\pi = (\rho_l/\tau_1) : (\bar{\rho}_g/\tau_2), \quad \tau_1 = \rho_l L / \alpha_l S_{l0} q_0, \quad \tau_2 = h_0^2 / \bar{\chi}.$$

Здесь $\bar{\rho}_g$ и $\bar{\chi}$ – характерные значения плотности газа и коэффициента пьезопроводности.

Из (4) следует, что распределение насыщенности конденсированной фазы \bar{S}_l имеет волновой характер, динамика которого определяется локальным тепловыделением распределенного по объему теплового источника. Распределение интенсивности электромагнитного излучения в просветляющейся среде зависит не только от координаты (как в законе Бугера – Ламберта), но и от времени (второе выражение (4)). Это выражение определяет волну просветления среды, которая по сравнению с волной насыщенности имеет обратный характер изменения по времени и координате. Скорость движения этих волн определяется из выражения

$$\bar{v}_s = e^\tau / (e^\tau - 1)$$

и со временем стремится к асимптотическому значению $\bar{v}_s = 1$ (в размерном виде $v_s = q_0 / m S_{l0} \rho_l L$).

Закон движения фронта волны имеет вид

$$z_s(\tau) = \ln(e^\tau - 1).$$

Ширина области фазового перехода имеет постоянную длину $\Delta x_s = h_0 \ln(S_{l1} / S_{l2})$, где S_{l1} и S_{l2} – характерные значения насыщенности на переднем ($S_{l1} \rightarrow S_{l0}$) и тыльном ($S_{l2} \rightarrow 0$) фронтах волны.

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 , в которые τ входит как параметр, определяются видом конкретных граничных условий для давления в рассматриваемой области $0 < x < l$.

Результаты численного расчета задачи (1)–(3) показывают удовлетворительное совпадение с аналитическим решением.

Список литературы

1. Хабибуллин И.Л. Электромагнитная термомеханика поляризующихся сред. Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 2000. 246 с.

INVESTIGATING THE DYNAMICS OF PHASE TRANSITIONS IN POROUS MEDIA INITIATED BY ELECTROMAGNETIC RADIATION HEATING

I.L. Khabibullin, F.F. Nazmutdinov, A.T. Khamitov

The dynamics of phase transformations in porous media initiated by electromagnetic radiation heating is investigated. Models of phase transformations in the enlightenment mode (i.e., when the newly formed phase does not practically absorb the electromagnetic radiation) are considered. The results of the analytical and numerical analysis of the equations of heat and mass transfer in the porous media in the presence of dissipation of electromagnetic radiation energy are presented.

Keywords: electromagnetic radiation, heating, enlightenment, heat and mass transfer, phase transition, porous media.