

УДК 532.546

УЧЕТ МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

© 2011 г.

Л.Ф. Ситдикова, И.К. Гималтдинов, В.Л. Дмитриев

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишевой

tact1988@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Проведено теоретическое исследование волновых процессов во влажных, насыщенных газом пористых средах с учетом межфазных сил взаимодействия, тепло- и массообмена между скелетом пористой среды, жидкостью и газом. Получено дисперсионное соотношение, на основе которого исследовано влияние водной пленки на характер распространения акустических волн в среде. Указаны области частот, в пределах которых на распределение волны оказывают основное влияние или теплообменные, или массообменные процессы.

Ключевые слова: пористая среда, дисперсионное соотношение, линейные волны, теплообмен, массообмен, волновое число.

Большинство сред, встречающихся в природе и используемых в технике, не являются однородными и не могут быть отнесены к классу жидкостей, газов или твердых деформируемых тел.

Кроме того, на производствах, где возможна конденсация водяного пара на стенках пор материала, используемого в качестве звукоизоляции помещений, приходится сталкиваться с влажными пористыми средами. Присутствие водной пленки внутри пор среды может повлиять на звукоизолирующие способности материала. Рассматривается возможность учета тепло- и массообменных процессов в рамках ячеистой модели.

Рассмотрим влажную насыщенную газом пористую среду (например, губку). При описании распространения одномерных волн в такой среде примем следующие допущения. Будем считать, что значения длин рассматриваемых волн намного больше размеров пор, а скорости жидкой пленки и скелета при прохождении волны равны. В качестве характерных размеров среды примем средний радиус пор a_0 , среднюю толщину водной пленки h_0 и среднюю полутолщину стенок пор b_0 .

Система уравнений, описывающих рассматриваемый процесс, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial x} = -I, \quad \frac{\partial p_{vg}}{\partial t} + \rho_{vg} \frac{\partial v_{vg}}{\partial x} = I,$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_{vg0} \frac{\partial v_{vg}}{\partial t} = -\alpha_{vg0} \frac{\partial p_{vg}}{\partial x} - \bar{F}_{gl},$$

$$\rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} = -\alpha_{l0} \frac{\partial p_l}{\partial x} - \bar{F}_{ls} + \bar{F}_{gl},$$

$$\rho_{vg0} \frac{\partial v_{vg}}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial x} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} = \alpha_{s0} \frac{\partial \sigma_s}{\partial x} -$$

$$-\alpha_{vg0} \frac{\partial p_{vg}}{\partial x} - \alpha_{l0} \frac{\partial p_l}{\partial x}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} + \frac{\sigma_s}{\mu_s},$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x}, \quad p_l - p_{l0} = C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0),$$

$$I = 4\pi a_0^2 n_0 j,$$

$$p_{vg} = (\rho_{v0}^0 \beta_v + \rho_{g0}^0 \beta_g) T'_{vg} = \rho_{vg0}^0 \beta T'_{vg},$$

$$F_{ij} = F_B + F_m + F_\mu,$$

$$F_B = 6\eta_B \alpha_{vg0} \alpha_{s0} \times$$

$$\times a_0^2 \sqrt{\pi \rho_{vg}^0 \mu_g} \int_{-\infty}^t \frac{\partial}{\partial \tau} (v_{vg} - v_s) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}},$$

$$F_m = \frac{1}{2} \eta_m \alpha_{vg0} \alpha_{s0} \rho_{vg0}^0 \left(\frac{\partial v_{vg}}{\partial t} - \frac{\partial v_s}{\partial t} \right),$$

$$F_\mu = \frac{9}{2} \eta_\mu \alpha_{vg0} \alpha_{s0} \mu_g (v_{vg} - v_s) a_0^{-2}.$$

Здесь p_{vg} и p_l – давление в газовой и жидкой фазе; $\alpha_s, \alpha_g, \alpha_l$ – объемные содержания твердой, жид-

кой и газовой фаз соответственно; σ_s – напряжение в скелете; E_s и μ_s – модуль упругости и коэффициент динамической вязкости пористого скелета; F_m – сила присоединенных масс, вызванная инерционным взаимодействием фаз; F_μ – аналог силы вязкого трения Стокса; F_B – аналог силы Бассэ, проявляющейся при высоких частотах из-за нестационарности вязкого пограничного слоя около границы с твердой фазой; μ_g – динамическая вязкость газа; η_m, η_μ, η_B – коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды; I и j – интенсивности фазовых переходов, отнесенные к единице объема смеси и к единице площади поверхности раздела фаз.

Дополнительным индексом 0 внизу снабжены параметры, соответствующие невозмущенному состоянию, а параметры без этого индекса выражают малые возмущения параметров от равновесного значения; верхний индекс 0 соответствует истинному значению параметра. Штрихами наверху снабжены микропараметры.

Для описания распределения температур в ячейке пористой среды запишем систему уравнений теплопроводности:

$$\rho_{vg0}^0 c_{vg} \frac{\partial T'_{vg}}{\partial t} = \lambda_{vg} r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_{vg}}{\partial t} - (\beta_g - \beta_v) T_{vg0} \frac{\partial g'}{\partial t} \quad (0 < r < a_0),$$

$$\frac{\partial g'}{\partial t} = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(Dr^2 \frac{\partial g'}{\partial r} \right) \quad (0 < r < a_0),$$

$$\rho_{l0}^0 c_l \frac{\partial T'_l}{\partial t} = \lambda_l \frac{\partial^2 T'_l}{\partial r^2} + l \frac{\partial g'}{\partial t} \rho_{l0}^0 \quad (a_0 < r < a_0 + h_0),$$

$$\rho_{s0}^0 c_s \frac{\partial T'_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T'_s}{\partial r^2}$$

$$(a_0 + h_0 < r < a_0 + b_0 + h_0),$$

где λ_j и c_j – соответственно коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости при постоянном давлении, g' – распределение массового паросодержания, D – коэффициент диффузии, l – удельная теплота парообразования, β – газовая постоянная.

Граничные условия для данной системы имеют вид:

$$T'_{vg} = T'_l, \quad \lambda_l \frac{\partial T'_l}{\partial r} = \lambda_{vg} \frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} + jl,$$

$$j = \frac{\rho_{vg0}^0 D}{1 - g_0} \frac{\partial g'}{\partial r} \quad (r = a_0),$$

$$T'_l = T'_s, \quad \lambda_s \frac{\partial T'_s}{\partial r} = \lambda_l \frac{\partial T'_l}{\partial r}, \quad (r = a_0 + h_0),$$

$$\frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial g'}{\partial t} = 0 \quad (r = 0),$$

$$\frac{\partial T'_s}{\partial r} = 0 \quad (r = a_0 + b_0 + h_0).$$

В результате решения задачи получим дисперсионное соотношение, на основе которого проводятся численные расчеты. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы.

В зависимости от характерных размеров пор среды и диапазонов частот на распространение акустических волн основополагающее влияние могут оказывать как теплообменные, так и массообменные процессы, а также тепло- и массообменные процессы в совокупности. Проанализировав толщину слоев водной пленки, можно заключить, что они сильно влияют на затухание и скорость «быстрой» волны: для меньших толщин пленки коэффициент затухания для соответствующих частот больше, соответственно скорость «быстрой» волны меньше. Скорость «медленной» волны изменяется при этом незначительно.

По проведенным исследованиям можно также заключить, что параметры материала скелета пористой среды влияют в основном лишь на затухание и скорость «быстрой» волны, в то время как параметры «медленной» волны зависят от них очень незначительно. С ростом плотности и модуля упругости материала скелета уменьшается затухание «быстрой» волны и увеличивается скорость ее распространения.

Список литературы

1. Володин С.В., Дмитриев В.Л., Хусаинов И.Г. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, №5. С. 734–740.
2. Губайдуллин А.А., Мусаев Н.Д., Якубов С.Х. Исследование линейных волн в насыщенных пористых и проницаемых средах: Отчет о НИР №9 / ТОММС ИТ АН СССР. Тюмень, 1990. 47 с.
3. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

**ACCOUNTING FOR THE MASS AND HEAT EXCHANGE OF AN ACOUSTIC WAVE PROPAGATING
IN A POROUS MEDIUM**

L.F. Sitdikova, I.K. Gimaltdinov, V.L. Dmitriev

The wave processes in damp porous media saturated with gas are theoretically studied, taking into account inter-phase interaction forces of heat and mass exchange between the skeleton of the porous environment, the liquid and the gas. A dispersive relation is obtained, which is used to investigate the influence of the water film on the character of distribution of acoustic waves in the medium. Frequency ranges are specified in which the wave distribution is mostly influenced either by heat exchange, or by mass exchange processes.

Keywords: porous medium, dispersive relation, linear waves, heat exchange, mass exchange, wave number.