УДК 532.546

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЧАСТИЧНО НАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

С.В. Лукин

Институт механики Уфимского научного центра РАН

serg@imech.anrb.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Рассматривается пористая среда, насыщенная жидкостью с пузырьками газа. На основе предположений механики многофазных сред разработана математическая модель. Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов и выявлены границы применимости математической модели. Исследовано влияние газовой фазы на распространение слабых акустических возмущений в пористых средах, насыщенных газожидкостной смесью, в частности на скорость и затухание медленной волны. Получены зависимости для асимптотических значений фазовых скоростей волн. Определены области преобладания вязкого затухания, обусловленного радиальным движением жидкости в пористой среде около осциллирующих пузырьков, над акустическими потерями. Качественно проанализировано влияние тепловой необратимости газовой фазы на скорость и затухание волн первого и второго рода.

Ключевые слова: пористая среда, фазовая скорость, декремент затухания, быстрая волна, медленная волна.

Математическая модель

Опытами [1] подтверждено, что при незначительном увеличении содержания газа, от нуля до нескольких процентов общего объема среды, интенсивность угасания взрывных волн с расстоянием возрастает в десятки и сотни раз. В [2] была получена система линейных уравнений для трехфазной смеси (пористая среда, жидкость, пузырьки газа), учитывающая дисперсионные эффекты вследствие колебаний пузырьков в волне. Математические модели взаимодействия ударных волн в трехфазных средах и экспериментальные исследования рассмотрены в работах [3, 4]. На примере натурных экспериментов с пузырьками воздуха и гелия, показано, что изменение коэффициента температуропроводности газа существенно изменяет диссипативные свойства среды. В настоящем исследовании рассматривается распространение волн Френкеля–Био в пористой среде, насыщенной газожидкостной смесью.

Построение математической модели осуществляется в рамках предположений механики многофазных сред [5], кроме того, предполагается, что: объемная концентрация пузырьков мала ($\psi << 1$); смесь состоит из пузырьков одинакового радиуса; изменение вязкости жидкости, связанное с наличием в ней пузырьков пренебрежимо мало; эффекты поступательного движения пузырьков относительно жидкости несущественны; давление в смеси равно давлению в жидкости на расстояниях, много больше радиуса пузырька (допущение Когарко–Иорданского [6]). Для описания теплообмена внутри пузырька используется двухтемпературное приближение, где, помимо температуры газа, вводится температура ее межфазной границы.

Исследуется линеаризованная (относительно начального состояния) система уравнений, описывающая движение пористой среды, насыщенной газожидкостной смесью [2, 5]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{m0}\frac{\partial \upsilon_m}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \rho_{20}\frac{\partial \upsilon_2}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_{m0}\frac{\partial \upsilon_1}{\partial t} + \alpha_{10}\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A(\upsilon_1 - \upsilon_2) - B\frac{\partial}{\partial t}(\upsilon_1 - \upsilon_2),$$

$$\rho_{20}\frac{\partial \upsilon_2}{\partial t} + \alpha_{20}\frac{\partial p_1}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{2*}}{\partial x} =$$

$$= A(\upsilon_1 - \upsilon_2) + B\frac{\partial}{\partial t}(\upsilon_1 - \upsilon_2), \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + 4\frac{\mu_1}{\rho_{10}^0 {r_0}^2}\left(1 + \frac{\alpha_{10} r_0^2}{4k}\right)\frac{\partial r}{\partial t} =$$

$$= \frac{p_3 - p_1}{\rho_{10}^0 r_0} + \frac{2\Sigma}{\rho_{10}^0 {r_0}^3} r,$$

$${r_0}^2 \frac{\partial p_3}{\partial t} + 3\gamma p_{30} r_0 \frac{\partial r}{\partial t} = -\frac{3}{2}(\gamma - 1)\lambda_3 Nu_3 T_3,$$

с замыкающими соотношениями:

$$\psi = \psi_0 (3 r_0^{-1} r + \rho_{m0}^{-1} \rho_m),$$

$$\rho_1^0 = \frac{1}{(1-\psi_0)\alpha_{10}} \rho_1 - \frac{\rho_{10}^0}{\alpha_{10}} \alpha_1 + \frac{\rho_{10}^0}{(1-\psi_0)} \psi,$$

$$\rho_2^0 = \frac{C_1^2}{C_2^2} \rho_1^0 - \frac{\nu \sigma_{2*}}{(1-\alpha_{10}) C_2^2},$$

$$\rho_3^0 = \frac{1}{\alpha_{10}\psi_0} \rho_3 - \frac{\rho_{30}^0}{\alpha_{10}} \alpha_1 - \frac{\rho_{30}^0}{\psi_0} \psi, \qquad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{1-\alpha_{10}}{\rho_{20}^0} \rho_2^0 - \frac{1}{\rho_{20}^0} \rho_2,$$

$$T_3 = \frac{1}{\rho_{30}^0} (R^{-1} p_3 - T_0 \rho_3^0).$$

Индекс 1 соответствует жидкой фазе, 2 – твердой фазе, 3 – газовой фазе, m – газожидкостной смеси, нижний индекс 0 – начальное значение параметра; ρ_i, ρ_i^0 – приведенная и истинная плотности i-й фазы; $\rho_m = \rho_1 + \rho_3$ – приведенная плотность газожидкостной смеси; p_1 – давление жидкости вдали от пузырька, p_2 – давление «псевдогаза» состоящего из твердых частиц, p_3 – давление газа внутри пузырька; μ_1 – динамическая вязкость жидкости; r – радиус пузырька; υ_2, υ_m – массовая скорость частиц скелета и газожидкостной смеси; α_1 – пористость газожидкостной смеси; σ_{2*} – приведенное напряжение скелета; Σ – коэффициент поверхностного натяжения; E_{f*} – мгновенный модуль упругости; C_1, C_2 – скорости звука в жидкости и в материале твердых частиц; A, B – коэффициенты, учитывающие влияние силы трения Стокса и силы присоединенных масс; k – проницаемость пористой среды; R – универсальная газовая постоянная, T_3 – температура газа, ν – коэффициент Пуассона; $\mathrm{Nu}_3 = 2r(\nu_3 t^{(\omega)})^{-1/2}$ – эффективное число Нуссельта, $\nu_3 = \lambda_3 / (\rho_3^0 c_3)$ – коэффициент температуропроводности газа; $t^{(w)} = 2\pi/\omega$ – характерное время изменения размера пузырька; ω – частота, λ_3 – коэффициент теплопроводности газа, c_3 – теплоемкость газа.

Решение системы уравнений (1)–(3) ищется в виде затухающих бегущих волн с круговой частотой и комплексным волновым числом K. В длинноволновом приближении ($\omega \to 0$) получаем значение квадрата равновесной скорости звука в насыщенной пористой среде:

$$C_e^2 = \left[-\left(\frac{-(1-\alpha_{10})\psi_0}{\alpha_{10}} \frac{2\Sigma}{3r_0} + E_f \frac{2\Sigma}{3r_0} \frac{(1-\psi_0)}{C_1^2 \rho_{10}^0} - E_f \psi_0 \right) \times \frac{1}{p_{30}} + E_f \frac{(1-\psi_0)}{\rho_{10}^0 C_1^2} + \frac{1}{\alpha_{10}} \right] \times$$

$$\times \left[\left(\left(\psi_0 - \frac{2\Sigma}{3r_0} \frac{(1-\psi_0)}{C_1^2 \rho_{10}^0} \right) \frac{1}{p_{30}} + \frac{(1-\psi_0)}{\rho_{10}^0} \frac{1}{C_1^2} \right) (\rho_{m0} + \rho_{20}) \right]^{-1}. \qquad (4)$$

В коротковолновом приближении получаем оценку для «замороженной» скорости звука в смеси:

$$C_f^2 = [(\alpha_{10}\rho_{20} + B)\alpha_{10} + (\rho_{10}(1-\alpha_{10}) + B) \times (1-\psi_0)(1-\alpha_{10})] \times$$

$$\times \left[(\rho_{m0}\rho_{20} + (\rho_{m0} + \rho_{20}) B) \times \left(\frac{\alpha_{10}}{\rho_{10}^0 C_1^2} + \frac{\alpha_{20}}{\rho_{20}^0 C_2^2} \right) (1-\psi_0) \right]^{-1}. \qquad (5)$$

В низкочастотном и высокочастотном диапазонах тепловая необратимость в газовой фазе играет несущественную роль. Полученные зависимости для асимптотических значений фазовых скоростей волн можно использовать для качественного анализа волновых процессов в насыщенных пористых средах.

Работа выполнена при поддержке грантом Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-3483.2008.1 и РФФИ (грант №08-01-97033 р_поволжье_а).

Список литературы

1. Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е. Волны давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. №4. С. 85–92.

2. Bedford A., Stern M. A model for a wave propagation in gassy sediments // J. Acoust. Soc. America. 1983. V. 73, No 2. P. 409–417.

3. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волны давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками // ПМТФ. 1995. Т. 36, №1. С. 32–40.

4. Дунин С.З., Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Продольные волны в частично насыщенных пористых средах. Влияние газовых пузырьков // ПММ. 2006. Т. 6. С. 282–294.

5. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Москва, 1987. Ч. 1. 464 с.

6. Иорданский С.В. Об уравнениях движения жидкости, содержащей пузырьки газа // ЖПМТФ. 1960. №3. С. 102–110.

RESEARCH OF ACOUSTIC WAVES IN PARTIALLY SATURATED POROUS MEDIA

S.V. Lukin

A porous medium saturated with a liquid with gas bubbles is considered. On the basis of assumptions of mechanics of multiphase medium the mathematical model is developed. Comparison of numerical and experimental results is done and the scope of applicability of the mathematical model is assessed. The influence of a gas phase on distribution of weak acoustic indignations in the porous medium is investigated, in particular for the velocity and attenuation of a S-wave. Dependences for asymptotic values of phase velocity of waves are obtained. Predomination regins of the viscous attenuation caused by radial movement of a liquid in the porous medium are defined. The effect of thermal irreversibility of a gas phase on the velocity and attenuation of waves of the first and second kinds is qualitatively analyzed.

Keywords: porous medium, gas phase, phase velocity, phase attenuation, S-wave, P-wave.