

УДК 532.546:534.1

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВДОЛЬ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ НАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, 625000 Тюмень  
E-mails: gubai@tmn.ru, timms@ikz.ru

Исследованы зависимости от частоты скорости и коэффициентов затухания волн, распространяющихся вдоль плоской границы насыщенной пористой среды и газа (вакуума). Показано, что в зависимости от значений параметров насыщенной пористой среды и условий на границе возможно распространение одной или двух поверхностных мод.

Ключевые слова: пористая среда, граница, акустические волны.

**Введение.** Поверхностные акустические волны (ПАВ) являются важным объектом исследования в сейсмологии и сейсморазведке. Это основной тип волн, наблюдающихся при землетрясениях и взрывах, поскольку, распространяясь по поверхности, они затухают медленнее, чем объемные волны. В технике ПАВ могут использоваться для диагностики и контроля качества поверхности и приповерхностного слоя образцов.

В упругих твердых телах может существовать несколько типов поверхностных волн с вертикальной поляризацией [1, 2]. Любую поверхностную волну можно представить в виде комбинации неоднородных объемных волн в граничащих средах при определенных соотношениях амплитуд этих волн (в данном случае под неоднородной волной понимается двумерная монохроматическая волна, распространяющаяся вдоль границы в виде синусоиды и имеющая экспоненциальный профиль при удалении от границы). Вдоль границы раздела сред все объемные компоненты имеют одну и ту же скорость распространения (скорость поверхностной волны). В то же время при удалении от границы каждая компонента либо убывает, либо возрастает. Если по мере увеличения глубины хотя бы одна из компонент поверхностной волны растет, то такая поверхностная волна называется вытекающей [1].

Основными типами волн, распространяющихся вдоль свободной поверхности однородного упругого полупространства или вблизи его границы с другой средой, являются волны Рэлея, Стоунли, а также псевдоволна Рэлея.

Волна Рэлея распространяется вдоль свободной поверхности упругого полупространства и затухает по мере удаления от нее в глубь среды. Скорость этой волны несколько меньше скорости поперечной волны.

Волна Стоунли может распространяться вдоль границы двух твердых полупространств (при определенных соотношениях между параметрами граничащих сред) или вдоль границы твердого и жидкого полупространств (при любых соотношениях параметров твердой среды и жидкости). Скорость волны Стоунли меньше скоростей объемных

волн в обеих средах. Как и в волне Рэлея, при удалении от поверхности раздела возмущения затухают. Вдоль поверхности волны Рэлея и Стоунли распространяются без дисперсии и затухания.

Псевдволна Рэлея [1–4] может распространяться вдоль границы твердого и жидкого полупространств, в случае если скорость звука в жидкости меньше скорости волны Рэлея на границе твердого полупространства и вакуума. Скорость псевдволны Рэлея больше скорости звука в жидкости, но меньше скорости поперечной волны в твердом теле. Такая поверхностная волна является комбинацией неоднородных продольной и поперечной волн в твердой среде и неоднородной волны в жидкости, причем амплитуда последней экспоненциально увеличивается по мере удаления от границы. Иными словами, псевдволна Рэлея является “вытекающей” волной. Тот факт, что по мере удаления от границы неоднородная волна в жидкости растет, на первый взгляд противоречит общим законам физики. На самом деле при распространении такой волны происходит непрерывное переизлучение энергии из твердого полупространства в жидкое [1]. При распространении псевдволны Рэлея ее амплитуда уменьшается, т. е. такая поверхностная волна распространяется, постепенно затухая, что обусловлено переизлучением, и существует только в некоторой области вблизи источника.

Ультразвуковые поверхностные волны, в том числе “вытекающие”, распространяющиеся вдоль границы твердого тела и жидкости, наблюдались также экспериментально [5]. Полученные значения скорости и коэффициентов затухания псевдволны Рэлея хорошо согласуются с теоретическими. В [5] отмечено, что наличие жидкости на границе приводит к увеличению фазовой скорости поверхностной волны рэлеевского типа.

В пористой среде, в отличие от упругого твердого тела, возможно распространение продольных волн двух типов, что было предсказано в работах [6, 7] на основе двухфазной модели пористой среды и позднее подтверждено в эксперименте [8]. Поэтому распространение поверхностных волн в таких средах может иметь особенности, не свойственные поверхностным волнам в однофазных упругих средах. В работе [9] впервые рассмотрено распространение поверхностных волн в пористой среде в рамках модели Био [7]. Условия на границе пористой среды с вакуумом или жидкостью изучались в [10]. При исследовании волновых процессов вблизи границы пористой среды с флюидом или вакуумом обычно рассматриваются случаи полностью открытых пор, когда происходит беспрепятственный переток флюида через границу, полностью закрытых пор, когда отсутствует переток флюида через границу, а также промежуточные случаи ограниченного перетока флюида через границу.

В высокочастотном приближении в рамках теории Био детальное исследование поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы раздела пористой среды и жидкости, проведено в работе [11]. Расчеты выполнены в широком диапазоне значений упругих параметров скелета пористой среды при наличии открытых и закрытых пор на границе пористой среды. Установлено, что в высокочастотном диапазоне в зависимости от значений упругих параметров скелета и жидкости и условий на границе возможно распространение одной, двух или трех поверхностных мод. Среди полученных решений, соответствующих поверхностным волнам, авторы работы [11] выделяют “истинную” моду, скорость которой меньше скоростей всех объемных волн в обеих граничащих средах, а также псевдомоды Рэлея и Стоунли. Скорость псевдомоды Стоунли больше скорости медленной продольной волны в пористой среде, но меньше скорости звука в жидкости, граничащей с пористой средой. Скорость псевдомоды Рэлея несколько ниже скорости сдвиговой волны в пористой среде, но превышает скорости медленной продольной волны в пористой среде и звуковой волны в жидкости. Каждая псевдомида является “вытекающей”, так как амплитуда одной или двух ее объемных составляющих нарастает по мере удаления волны от границы раз-

дела сред. “Истинная” мода распространяется вдоль границы, не затухая, а псевдомоды при распространении вдоль граничной поверхности затухают вследствие переизлучения энергии в глубь пористой среды и жидкости (или только пористой среды).

В работе [12] получено выражение для функции Грина, позволяющее найти отклик системы пористая среда — флюид на импульсы давления, возбуждаемые источником во флюиде. Установлено, что при воздействии импульсного источника, расположенного во флюиде вблизи границы с пористой средой, в этой среде возбуждаются как объемные, так и поверхностные моды, соответствующие поверхностным модам, полученным в [11]. Несмотря на то что в [12] исследование проведено с помощью функции Грина, без использования предположений о существовании поверхностных мод на границе пористая среда — флюид, его результаты согласуются с результатами работы [11].

В экспериментах [13] наблюдалась новая поверхностная мода (отличная от поверхностных волн в твердых телах), возбуждаемая на поверхности насыщенного жидкостью пористого образца, при этом значения скорости наблюдаемой волны согласуются с теоретическими значениями для “истинной” поверхностной моды, предсказанными в [11]. В [14] описывается способ возбуждения и регистрации поверхностных волн на границе природных кернов и синтетических пористых образцов с волнистой (периодической) поверхностью, частично или полностью погруженных в жидкость. Скорость поверхностной моды, наблюдаемой на границе насыщенного жидкостью пористого образца и воздуха, составляла приблизительно 60 % скорости поперечной волны, что близко к теоретическому значению для “истинной” поверхностной волны [11].

В работе [15] проведено теоретическое исследование волн, распространяющихся вдоль границы пористой среды с вакуумом, флюидом или другой пористой средой. В высокочастотном приближении получены асимптотические выражения для скоростей поверхностных волн. Доказывается существование корней дисперсионных уравнений, соответствующих “вытекающим” поверхностным волнам.

В работах [16, 17] впервые исследованы частотные зависимости скорости и коэффициентов затухания поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы насыщенной пористой среды и жидкости. Показано, что в зависимости от значений параметров насыщенной пористой среды и условий на границе возможно распространение одной, двух или трех поверхностных мод, каждая из которых является “истинной” или псевдомодой. Полученные результаты согласуются с известными результатами исследований, проведенных в высокочастотном приближении.

Целью данной работы является исследование в широком частотном диапазоне поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы насыщенной жидкостью пористой среды и газа, а также изучение частотных зависимостей скорости и коэффициентов затухания найденных поверхностных мод.

**Уравнения движения.** Исследование проводится в рамках двухфазной модели пористой среды с упругим скелетом [18, 19]. Линеаризованные уравнения движения насыщенной пористой среды имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_{s0} \nabla^k v_s^k &= 0, & \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \rho_{f0} \nabla^k v_f^k &= 0, \\ \rho_{s0} \frac{\partial v_s^k}{\partial t} &= -\alpha_{s0} \nabla^k p_f + \nabla^l \sigma_{2*}^{kl} + F^k, & \rho_{f0} \frac{\partial v_f^k}{\partial t} &= -\alpha_{f0} \nabla^k p_f - F^k, \\ (\sigma_{s*}^{kn})' &= \alpha_{s0} (\lambda_* \delta^{kn} \varepsilon_s^{mm} + 2\mu_* \varepsilon_s^{kn} + \nu_* \delta^{kn} p_f'), & \nu_* &= (\lambda_* + 2\mu_*/3)/K_s, \\ \frac{\partial \varepsilon_s^{kn}}{\partial t} &= \frac{1}{2} (\nabla^k v_s^n + \nabla^n v_s^k), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho'_f &= \alpha'_f \rho_{f0}^0 + \alpha_{f0} \rho_{f0}', & \rho'_s &= \alpha'_s \rho_{s0}^0 + \alpha_{s0} \rho_{s0}', & \alpha'_f + \alpha'_s &= 0, \\ p'_s &= K_s \rho_{s0}^0 / \rho_{s0}^0, & p'_f &= K_f \rho_{f0}^0 / \rho_{f0}^0, \\ p'_{s*} &= \alpha_{s0} (p'_s - p'_f) + \alpha'_s (p_{s0} - p_{f0}), & p_{s*} &= -\sigma_{s*}^{mm} / 3.\end{aligned}$$

Здесь верхние индексы соответствуют пространственным координатам; по повторяющимся верхним индексам проводится суммирование; нижние индексы  $s, f$  соответствуют твердой или жидкой фазе; нижним индексом 0 отмечены невозмущенные значения величины, а штрихом — отклонение значения величины от ее невозмущенного значения ( $w' = w - w_0$ );  $\alpha_j, \rho_j, \rho_j^0, v_j$  — объемная концентрация, приведенная и истинная плотности и скорость  $j$ -й фазы ( $j = s$  или  $j = f$ ) соответственно;  $p_f$  — давление в жидкости;  $\sigma_{s*}$  — приведенное напряжение в скелете среды;  $F$  — сила межфазного взаимодействия;  $\alpha_s \lambda_*, \alpha_s \mu_*$  — модули упругости скелета пористой среды;  $\varepsilon_s$  — деформации твердой фазы;  $p_s$  — давление внутри твердой фазы;  $K_s, K_f$  — объемные модули упругости для материала твердой фазы и жидкости соответственно.

Выражение для межфазной силы  $F$  в случае распространения монохроматической волны с частотой  $\omega$  принимается в виде [19]

$$\begin{aligned}F &= F_m + F_\mu + F_B, & F_m &= 0,5\eta_m \alpha_{f0} \alpha_{s0} \rho_{f0}^0 i\omega (v_f - v_s), \\ F_\mu &= \eta_\mu a_*^{-2} \alpha_{f0} \alpha_{s0} \mu_f (v_f - v_s), & F_B &= \eta_B a_*^{-1} \alpha_{f0} \alpha_{s0} \sqrt{2\rho_{f0}^0 \mu_f \omega} (1 + i)(v_f - v_s).\end{aligned}$$

Здесь  $F_m$  — сила присоединенных масс, обусловленная инерционным взаимодействием фаз;  $F_\mu$  — сила вязкого трения Стокса;  $F_B$  — аналог силы Бассэ, возникающей вследствие нестационарности вязкого пограничного слоя вблизи границы жидкости и твердой фазы;  $i$  — мнимая единица;  $\mu_f$  — динамическая вязкость жидкости;  $a_*$  — характерный размер пор или зерен;  $\eta_m, \eta_\mu, \eta_B$  — коэффициенты инерционного, вязкого и вязкоинерционного взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Используемая в данной работе модель двухфазной пористой среды с упругим скелетом эквивалентна модели [7], применяемой зарубежными исследователями при изучении процессов в пористых средах. Основное различие заключается в форме записи выражения для силы межфазного вязкого взаимодействия  $F_\mu + F_B$ . В зарубежной литературе для этой силы, которая при предельном переходе к низким или высоким частотам асимптотически совпадает с  $F_\mu$  или  $F_B$  соответственно, принято использовать одно выражение для всех частот [20, 21]. В модели, используемой в данной работе, принимается выражение для вязкой силы межфазного взаимодействия в виде суммы квазистационарной и нестационарной составляющих, при этом в случае низких частот преобладает сила  $F_\mu$ , а в случае высоких —  $F_B$ .

**Поверхностные волны.** Пусть насыщенная жидкостью пористая среда занимает полупространство  $z > 0$  и граничит с газом, занимающим область  $z < 0$ . Линеаризованные уравнения движения газа в полупространстве  $z < 0$  примем в следующем виде:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_g}{\partial t} + \tilde{\rho}_{g0} \nabla^n \tilde{v}_g^n = 0, \quad \tilde{\rho}_{g0} \frac{\partial \tilde{v}_g}{\partial t} + \nabla \tilde{p}_g = 0, \quad \tilde{p}'_g = \frac{\tilde{K}_g \tilde{\rho}'_g}{\tilde{\rho}_{g0}}.$$

Рассмотрим двумерное движение, соответствующее распространению поверхностной волны вдоль оси  $x$ , при этом все величины зависят лишь от  $x$  и  $z$ . Гармоническую поверхностную волну можно рассматривать как комбинацию неоднородных объемных волн в пористой среде и газе. Потенциалы перемещений для пористой среды и газа запишем в виде

$$\mathbf{v}_j = \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial t}, \quad \mathbf{u}_j = \text{grad } \Phi_{j1} + \text{grad } \Phi_{j2} + \text{rot } \Psi_j, \quad \Psi_j = \{0, \Psi_j, 0\},$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_g = \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_g}{\partial t}, \quad \tilde{\mathbf{u}}_g = \text{grad } \tilde{\Phi}_g,$$

$$\begin{pmatrix} \Phi_{j1} \\ \Phi_{j2} \\ \Psi_j \\ \tilde{\Phi}_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{j1} e^{-\gamma_1 z} \\ A_{j2} e^{-\gamma_2 z} \\ iB_j e^{-\beta z} \\ \tilde{A}_g e^{\gamma_2 z} \end{pmatrix} \exp i(\omega t - kx).$$

Здесь  $\Phi_{j1}$ ,  $\Phi_{j2}$ ,  $\Psi_j$  — скалярные и векторные потенциалы для твердой ( $j \equiv s$ ) и жидкой ( $j \equiv f$ ) фаз пористой среды;  $\tilde{\Phi}_g$  — скалярный потенциал для газа, граничащего с пористой средой. Следует отметить, что волновые числа поверхностной волны  $k$ , продольных и поперечной волн в пористой среде  $k_{l1}$ ,  $k_{l2}$ ,  $k_t$ , звуковой волны в газе  $\tilde{k}_g$  и коэффициенты  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_g$  связаны следующими соотношениями:

$$k_{l1}^2 = k^2 - \gamma_1^2, \quad k_{l2}^2 = k^2 - \gamma_2^2, \quad k_t^2 = k^2 - \beta^2, \quad \tilde{k}_g^2 = k^2 - \gamma_g^2.$$

На границе  $z = 0$  выполнены условия непрерывности нормальных компонент полного напряжения  $\sigma$  в среде ( $\sigma^{ik} = -\delta^{ik} p_f + \sigma_{s*}^{ik}$ ), равенства объемов протекающих через границу флюидов, а также принято линейное соотношение между скачком давления и нормальной скоростью жидкости в пористой среде [10, 11]:

$$z = 0: \quad \sigma_{s*}^{xz} = 0, \quad -\sigma_{s*}^{zz} + p_f = \tilde{p}_g, \quad p_f - \tilde{p}_g = T \alpha_f (u_f^z - u_s^z), \quad \alpha_f (u_f^z - u_s^z) = \tilde{u}_g^z - u_s^z.$$

Параметр  $T$  характеризует граничную поверхность пористой среды: значение  $T = 0$  соответствует случаю открытых пор, когда происходит беспрепятственный переток флюида через границу пористой среды,  $T = \infty$  — случаю полностью закрытых пор на границе, а промежуточные конечные значения  $T > 0$  — ограниченному перетoku через границу.

Граница пористой среды с вакуумом является свободной, поэтому на граничной поверхности должны выполняться следующие условия:

$$z = 0: \quad \sigma_{s*}^{xz} = 0, \quad -\sigma_{s*}^{zz} + p_f = 0, \quad p_f = T \alpha_f (u_f^z - u_s^z).$$

Используя стандартную процедуру [1, 9, 11], получаем дисперсионное соотношение, позволяющее определить волновое число  $k$ , а также коэффициенты  $\gamma_1 = \sqrt{k^2 - k_{l1}^2}$ ,  $\gamma_2 = \sqrt{k^2 - k_{l2}^2}$ ,  $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2}$ ,  $\gamma_g = \sqrt{k^2 - \tilde{k}_g^2}$  как функции частоты  $\omega$ . Для нахождения комплексных корней  $k$  дисперсионного уравнения используется численный алгоритм поиска и уточнения корней уравнений в комплексной области. Затем вычисляются фазовая скорость и пространственный коэффициент затухания  $C = \omega / \text{Re } k$ ,  $\delta = -\text{Im } k$ .

**Результаты расчетов.** Расчеты проводились в широком диапазоне частот и значений параметров пористой среды для случаев открытых или закрытых пор на границе пористой среды и газа. Для сравнения проведены расчеты поверхностных волн, распространяющихся вдоль свободной границы (с вакуумом) насыщенной пористой среды.

Установлено, что в зависимости от того, являются граничные поры открытыми или закрытыми, возможно распространение одной или двух поверхностных мод: псевдомоды Рэля в случае открытых пор, медленной поверхностной моды и псевдомоды Рэля в случае закрытых пор. Скорость псевдомоды Рэля близка к скорости поперечной (сдвиговой) волны в насыщенной пористой среде. В случае, когда пористая среда граничит с вакуумом, медленная поверхностная мода является “истинной”, так как ее скорость меньше скоростей всех объемных (быстрой (деформационной) и медленной (фильтрационной) продольных и поперечной) волн в этой среде. Если насыщенная пористая среда граничит с газом, то медленная поверхностная мода не является истинной в строгом смысле, так как

Характеристики поверхностных волн, распространяющихся на границе насыщенной жидкостью пористой среды и газа или вакуума

Межфазная граница	Тип поверхностной волны	
	Открытые поры	Закрытые поры
Насыщенная жидкостью пористая среда — газ (воздух)	“Вытекающая” псевдомода Рэлея ( $C_g < C < C_t$ ; $\text{Re } \gamma_g < 0$ при всех частотах, $\text{Re } \gamma_2 < 0$ при высоких частотах)	“Вытекающая” псевдомода Рэлея ( $C_g < C < C_t$ ; $\text{Re } \gamma_g < 0$ при всех частотах, $\text{Re } \gamma_2 < 0$ при высоких частотах)
		“Вытекающая” “истинная” мода ( $C < C_{l2}$ при всех частотах, $C > C_g$ при высоких частотах, $\text{Re } \gamma_g < 0$ при всех частотах)
Насыщенная жидкостью пористая среда — вакуум	Псевдомода Рэлея ( $C_f < C < C_t$ ), “вытекающая” при высоких частотах ( $\text{Re } \gamma_2 < 0$ )	Псевдомода Рэлея ( $C_f < C < C_t$ ), “вытекающая” при высоких частотах ( $\text{Re } \gamma_2 < 0$ )
		“Истинная” мода ( $C < C_{l2}$ )

ее скорость меньше скоростей всех объемных волн в пористой среде, но при высоких частотах она превышает скорость звука в граничащем с пористой средой газе. По значениям скорости и коэффициентов затухания медленная поверхностная мода близка к истинной поверхностной моде, распространяющейся вдоль свободной поверхности насыщенной пористой среды, поэтому ее можно назвать “истинной” модой. Совпадение (с точностью до толщины линии на графике) значений фазовой скорости и пространственного декремента затухания поверхностных волн на границе пористой среды с газом и вакуумом (на свободной поверхности пористой среды) обусловлено тем, что волновое сопротивление газовой среды является пренебрежимо малым по сравнению с волновым сопротивлением насыщенной пористой среды. Поэтому в расчетах можно ограничиться более простым случаем свободной поверхности пористой среды.

Полученные результаты приведены в таблице, где перечислены поверхностные моды, распространяющиеся на границе насыщенной жидкостью пористой среды и газа или вакуума, для случаев открытых или закрытых пор на границе и указаны их свойства. Приведен диапазон скоростей поверхностной моды и указаны частоты, при которых псевдомода является “вытекающей” или “истинной”.

В расчетах полагалось, что пористой средой является водонасыщенный кварцевый песок с параметрами  $\alpha_f = 0,33$ ,  $a_* = 0,25$  мм,  $\lambda_* = \mu_* = 8 \cdot 10^9$  Па,  $\eta_m = 1$ ,  $\eta_\mu = 100$ ,  $\eta_B = 1,5$ . В качестве газа рассматривался воздух.

На рис. 1 показаны фазовая скорость и пространственный декремент затухания поверхностных мод в случае закрытых пор на границе. Там же для сравнения приведены скорости и декременты затухания объемных волн в пористой среде. На рис. 2 представлены зависимости от частоты безразмерных коэффициентов  $d_{l1} = \text{Re}(\gamma_1)\lambda$ ,  $d_{l2} = \text{Re}(\gamma_2)\lambda$ ,  $d_t = \text{Re}(\beta)\lambda$ ,  $d_g = \text{Re}(\gamma_g)\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны), характеризующих экспоненциальное убывание или нарастание объемных компонент поверхностных мод по мере удаления от границы раздела сред.

Псевдомода Рэлея является вытекающей, так как во всем частотном диапазоне  $d_g < 0$ , следовательно, при удалении от границы амплитуда ее  $g$ -компоненты нарастает вслед-

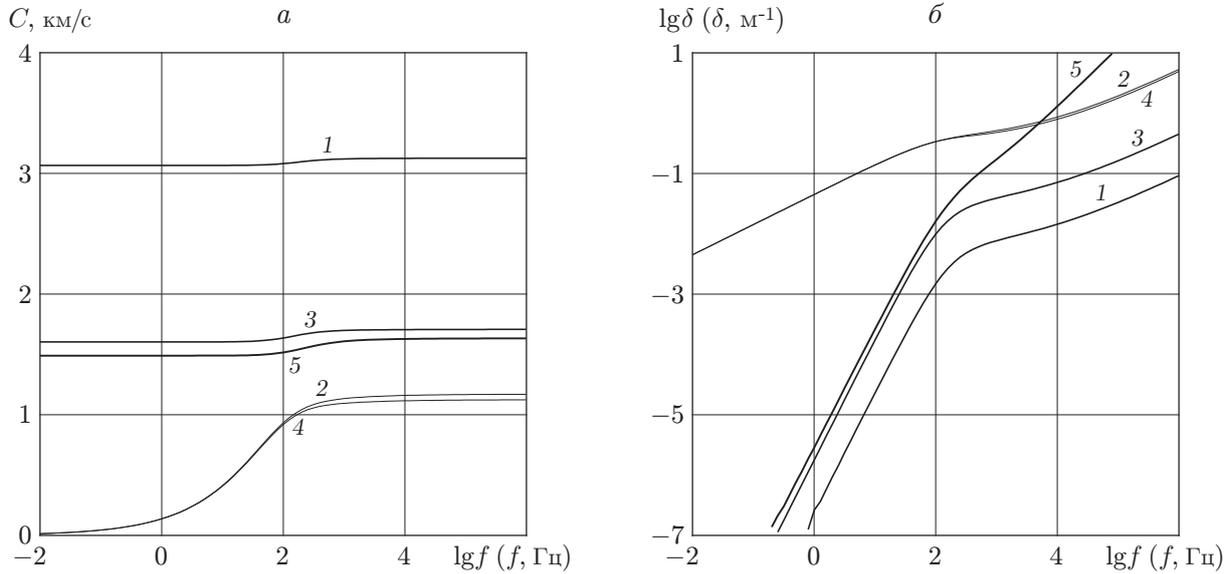


Рис. 1. Зависимости от частоты фазовой скорости  $C$  (а) и пространственного декремента затухания  $\delta$  (б) объемных продольных (1, 2), поперечной (3) волн в насыщенной пористой среде, “истинной” (4) моды и псевдомоды Рэлея (5) в случае закрытых пор на границе водонасыщенного кварцевого песка и воздуха

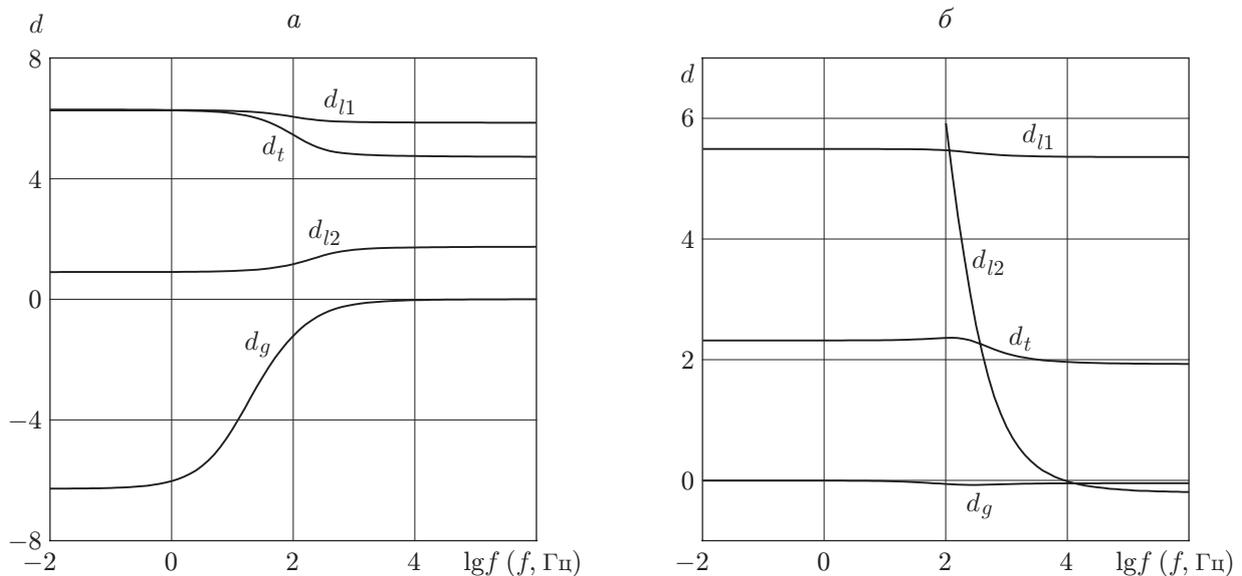


Рис. 2. Зависимости от частоты коэффициентов затухания объемных компонент “истинной” моды (а) и псевдомоды Рэлея (б) на расстоянии от поверхности раздела водонасыщенного кварцевого песка и воздуха, равном длине волны, в случае закрытых пор на границе

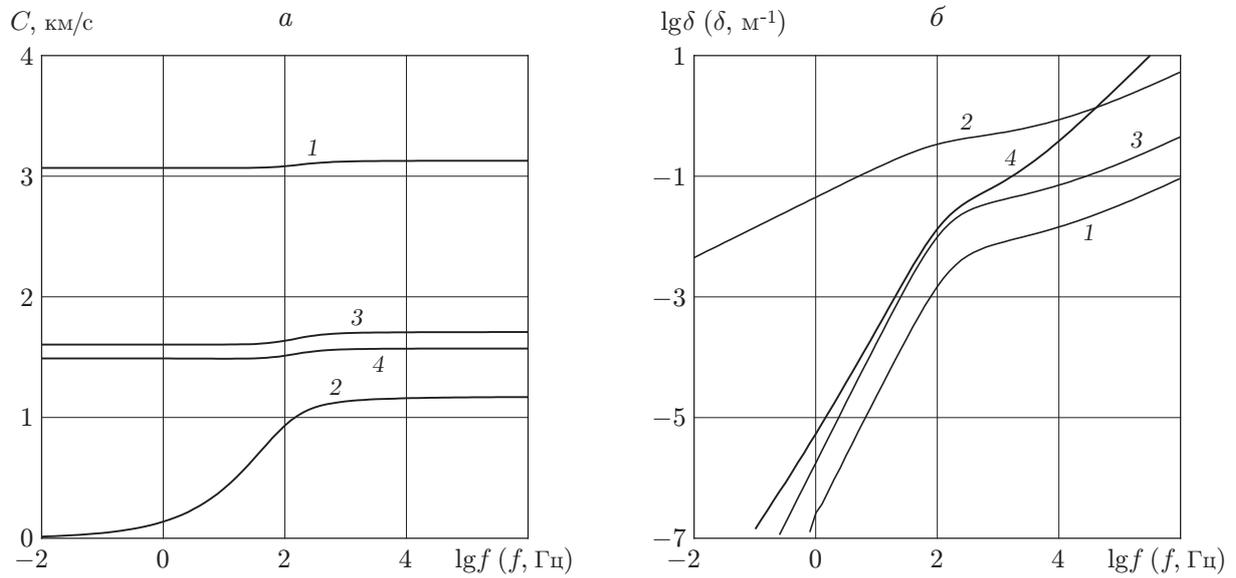


Рис. 3. Зависимости от частоты фазовой скорости  $C$  (а) и пространственного декремента затухания  $\delta$  (б) объемных продольных (1, 2), поперечной (3) волн в насыщенной пористой среде и псевдомоды Рэлея (4) в случае открытых пор на границе водонасыщенного кварцевого песка и воздуха

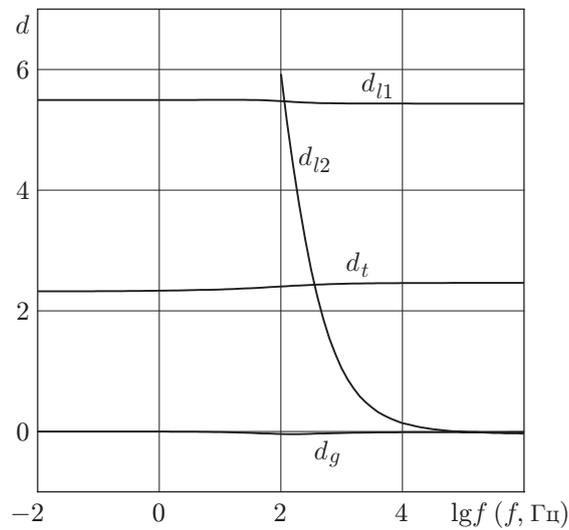


Рис. 4. Зависимости от частоты коэффициентов затухания объемных компонент псевдомоды Рэлея на расстоянии от поверхности раздела водонасыщенного кварцевого песка и воздуха, равном длине волны, в случае открытых пор на границе

ствие переизлучения энергии в полупространство, заполненное газом. При высоких частотах амплитуда  $l_2$ -компоненты псевдомоды Рэлея также увеличивается, однако при понижении частоты возрастание  $l_2$ -компоненты, обусловленное переизлучением, сменяется ее убыванием вследствие межфазного вязкостного силового взаимодействия.

На рис. 3, 4 представлены зависимости от частоты скорости псевдомоды Рэлея (распространяющейся вдоль границы между пористой средой и газом) и коэффициентов, характеризующих убывание или нарастание ее объемных составляющих, в случае открытых пор. Свойства псевдомоды Рэлея в случае открытых пор на границе близки к свойствам псевдомоды Рэлея в случае закрытых пор на границе.

**Заключение.** Таким образом, в работе исследованы частотные зависимости скорости и коэффициентов затухания поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы насыщенной жидкостью пористой среды и газа или вакуума. Установлено, что в зависимости от значений параметров насыщенной пористой среды и условий на границе возможно распространение одной или двух поверхностных мод — псевдомоды Рэлея и “истинной” моды, каждая из которых является вытекающей волной, затухающей вследствие как межфазного силового взаимодействия в пористой среде, так и переизлучения в неоднородную волну в полупространстве, заполненном газом. Скорость “истинной” поверхностной моды близка к скорости медленной продольной (фильтрационной) волны в пористой среде. Скорость псевдомоды Рэлея несколько ниже скорости сдвиговой волны в пористой среде, а свойства этой псевдомоды слабо зависят от того, являются ли граничные поры открытыми или закрытыми. В случае вакуума вторая мода является истинной.

Показано, что в случае, когда насыщенная жидкостью пористая среда граничит с газом или вакуумом, значения фазовой скорости и пространственного декремента затухания поверхностных волн практически совпадают. Это объясняется значительно меньшим волновым сопротивлением газа по сравнению с волновым сопротивлением насыщенной пористой среды.

В случае вакуума псевдомоде Рэлея является “вытекающей” лишь при высоких частотах. Ее компонента, соответствующая фильтрационной волне, при высоких частотах возрастает, что обусловлено переизлучением, а при низких частотах убывает вследствие межфазного вязкостного силового взаимодействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Викторов И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
2. **Бреховских Л. М.** Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
3. **Ansell J. H.** The roots of Stonely wave equation for solid-liquid interfaces // *Pure Appl. Geophys.* 1972. V. 94, N 2. P. 172–188.
4. **Uberall H.** Surface waves in acoustics // *Physical acoustics* / Ed. by W. P. Mason. N. Y.; L.: Acad. Press, 1973. V. 10. P. 1–60.
5. **Викторов И. А., Грищенко Е. К., Каекина Т. М.** Исследование распространения ультразвуковых поверхностных волн на границе твердого тела с жидкостью // *Акуст. журн.* 1963. Т. 9, № 2. С. 162–170.
6. **Френкель Я. И.** К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // *Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз.* 1944. Т. 8, № 4. С. 133–150.
7. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1956. V. 28. P. 168–191.
8. **Plona T. J.** Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V. 36. P. 259–261.

9. **Deresiewicz H.** The effect of boundaries on wave propagation in a liquid-filled porous solid. 4. Surface waves in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1962. V. 52, N 3. P. 627–638.
10. **Deresiewicz H., Skalak R.** On uniqueness in dynamic poroelasticity // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1963. V. 53, N 4. P. 783–788.
11. **Feng S., Johnson D. L.** High-frequency acoustic properties of a fluid/porous solid interface. 1. New surface mode // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1983. V. 74, N 3. P. 906–914.
12. **Feng S., Johnson D. L.** High-frequency acoustic properties of a fluid/porous solid interface. 2. The 2D reflection Green's function // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1983. V. 74, N 3. P. 915–924.
13. **Nagy P. B.** Observation of a new surface mode on a fluid-saturated permeable solid // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 60. P. 2735–2737.
14. **Adler L., Nagy P. B.** Measurements of acoustic surface waves on fluid-filled porous rocks // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 17863–17869.
15. **Эдельман И. Я.** Волны на границах пористых сред // *Докл. АН.* 2001. Т. 379, № 2. С. 200–204.
16. **Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю.** Распространение волн вдоль границы насыщенной пористой среды и жидкости // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52, № 2. С. 201–211.
17. **Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю.** Волны на поверхности раздела насыщенной пористой среды и жидкости // *Докл. АН.* 2006. Т. 409, № 3. С. 324–327.
18. **Николаевский В. Н.** *Механика насыщенных пористых сред* / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. М.: Недра, 1970.
19. **Нигматулин Р. И.** *Динамика многофазных сред.* М.: Наука, 1987. Ч. 1.
20. **Johnson D. L., Koplik J., Dashen R.** Theory of dynamic permeability and tortousity in fluid-saturated porous media // *J. Fluid Mech.* 1987. V. 176. P. 379–402.
21. **Smeulders D. M. J., Eggels R. L. G. M., van Dongen M. E. H.** Dynamic permeability: reformulation of theory and new experimental and numerical data // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 245. P. 211–227.

*Поступила в редакцию 21/VII 2008 г.*

---