



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРОХОЖДЕНИЯ (ОБМЕНА) ВОЛН ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ СЛОЙ

Ю.А. Орлов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: OrlovYA@ingg.nsc.ru*

Приведены сейсмограммы проходящих и обменных волн через пористые водонасыщенные слои различной мощности в широком диапазоне углов падения. Данные получены методом ультразвукового моделирования в баке с водой. Выделены быстрая и медленная продольные и поперечная волны. Определены параметры волн и на их основе вычислены параметры Био. Проведен расчет коэффициентов прохождения волн через пористый водонасыщенный слой и дано сравнение с экспериментальными данными.

*Сейсмика, продольная волна, поперечная волна, быстрая продольная волна, медленная продольная волна, коэффициенты прохождения, коэффициенты отражения, поглощение, теория Био, пористая водонасыщенная среда, ультразвуковое моделирование*

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL TRANSMISSION (CONVERSION) COEFFICIENTS FOR WAVES CROSSING POROUS FLUID SATURATED MEDIA

Yu.A. Orlov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Acad. Koptuyga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: OrlovYA@ingg.nsc.ru*

Seismic records of converted and direct waves transmitting through the porous, fluid saturated layer of varying thickness, in wide range of incidence angles are introduced. Data are acquired via ultrasonic modeling in the tank of water. Converted shear, fast and slow compressional waves are being distinguished. Wave's parameters are being determined, on their basis Biot parameters were computed. Transmission coefficients through the porous water saturated media were estimated, and their comparison with experimental data is introduced.

*Seismic, compressional wave, shear wave, fast compressional wave, slow compressional wave, transmission coefficients, reflection, attenuation, Biot theory, porous fluid saturated media, ultrasonic modeling*

### ВВЕДЕНИЕ

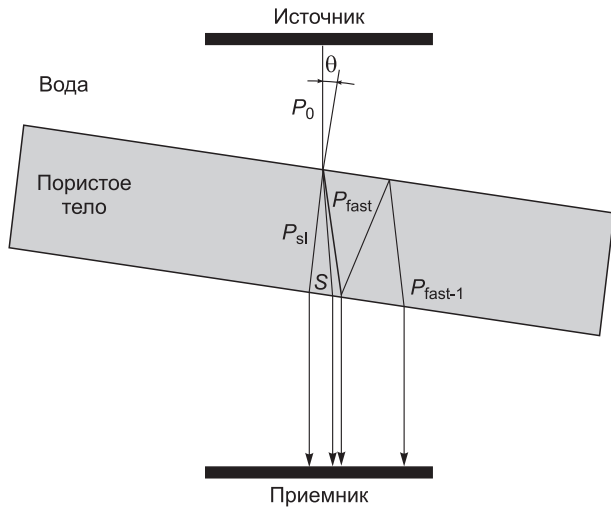
Описание поведения многофазных сред началось с работ Я.И. Френкеля [1] и М.А. Био [2]. Разработанная теория Био давала описание поглощения, обусловленного межфазовым вязким трением и, кроме того, предсказывала наличие двух продольных волн. В своем рассмотрении М.А. Био ввел некоторые параметры, характеризующие извилистость пор и поглощение при высоких частотах. Проверка теории поведения волн в пористых флюидонасыщенных средах проводилась с помощью ультразвукового моделирования, и первое экспериментальное подтверждение существования двух продольных волн в искусственных пористых средах получил Т. Пюна в 1980 г. [3]. O. Kelder и D. Smeulders [4] доказали существование двух продольных волн в реальной горной породе также в экспериментах на ультразвуке. Несмотря на важность этого направления, экспериментальных работ по изучению распространения волн в пористых средах явно недостаточно. Особый интерес представляет изучение коэффициентов отражения–прохождения на границе пористых флюидонасыщенных сред, позволяющее проверить динамические характеристики волн.

Цель настоящей работы – определение всех параметров, описывающих распространение волн в по-

ристой водонасыщенной среде в рамках теории Био. Используя полученные значения параметров, можно провести вычисление коэффициентов прохождения–отражения на границе воды и пористого водонасыщенного слоя и сравнить их с экспериментальными данными.

**Эксперимент.** В экспериментах Т. Пюна использовались искусственные пористые образцы, изготовленные путем спекания стеклянных шариков диаметром 0,21–0,29 мм при температуре 700–740 °С. Нами для проведения опытов применялись прямоугольные параллелепипеды, вырезанные из абразивного круга, который состоит из корундовых зерен размером 50–70 мкм, запеченных в керамической связке. Технология изготовления абразивных инструментов хорошо отлажена и, как показало тестирование образцов, они достаточно однородны и изотропны. В опытах использовалось несколько образцов, вырезанных из одного абразивного инструмента и имеющих разные размеры в направлении просвечивания (от 19,4 до 7,2 мм) и одинаковые размеры в ортогональных направлениях (100 и 42 мм).

Измерения на сухих образцах дали следующие результаты:  $V_{0,p} = 5,7 \pm 0,2$  км/с;  $V_{0,s} = 3,5 \pm 0,2$  км/с;



**Рис. 1.** Схема эксперимента при просвечивании пористого образца в баке с водой:

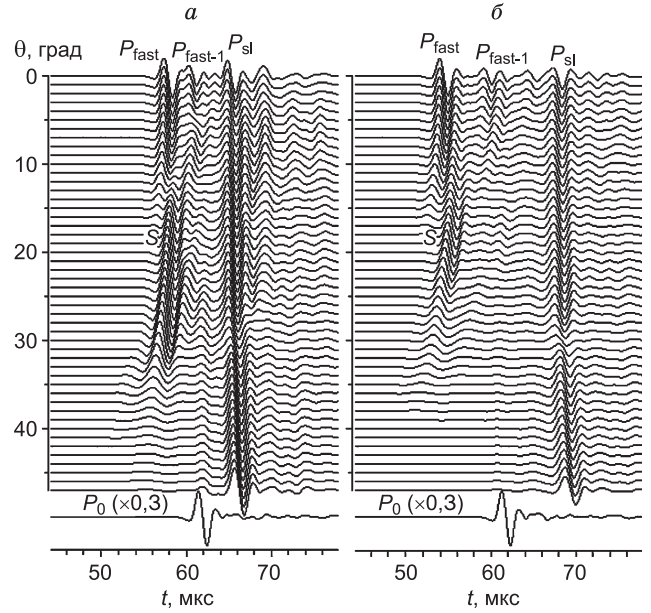
$P_0$  – волна в жидкости;  $P_{fast}$  – быстрая и  $P_{sl}$  – медленная продольные волны;  $S$  – поперечная волна;  $P_{fast-1}$  – кратная быстрая продольная волна;  $\theta$  – угол наклона.

$\gamma = 0,61$ ;  $\rho_s = 2,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность материалов скелета;  $\phi = 0,37 \pm 0,01$  – пористость;  $k = 11 \pm 1 \text{ Д}$  ( $10^{-12} \text{ м}^2$ ) – проницаемость. Для объемного модуля материалов скелета принималось оценочное значение  $K_s = 5 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$ , и, как показали расчеты, изменение этого значения в широком диапазоне практически не влияет на результаты. Добротность сухих образцов очень высока и можно считать, что декременты поглощения для продольной и поперечной волны равны нулю:  $\theta_p = 0$  и  $\theta_s = 0$ . Для воды были приняты следующие значения параметров:  $V_f = 1,486 \pm 0,008 \text{ км/с}$ ,  $\rho_f = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\zeta = 0,93 \pm 0,01 \text{ спз}$  ( $10^{-3} \text{ кг/(м·с)}$ ) – вязкость.

Схема проведения опытов, выполненных на установке “Эхо-1” [5], приведена на рис. 1. В баке с водой располагались источник и приемник на удалении 90 мм, между ними помещался пористый образец, который предварительно насыщался водой при вакуумной откачке, создаваемой форвакуумным насосом. Источник и приемник были изготовлены из пьезокерамической (ЦТС-19) пластины толщиной 2 мм; источник имел размер 30 мм по оси  $X$ , а приемник – 40 мм, в ортогональном направлении размеры источника и приемника были одинаковыми и составляли 36 мм.

При регистрации волновых полей пористый образец поворачивался вокруг своей оси на угол от  $-47$  до  $+47^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . Волновые поля имели симметричный вид, и на рис. 2 приведены фрагменты сейсмограмм для двух образцов в диапазоне углов от  $0$  до  $+47^\circ$ . Для каждого образца отдельно регистрировалась прямая волна по воде  $P_0$  (без объекта), и она приведена на сейсмограммах с коэффициентом усиления 0,3.

При малых углах падения на сейсмограммах выделяется быстрая продольная волна ( $P_{fast}$ ) и кратная ей волна ( $P_{fast-1}$ ), далее вступает медленная продоль-



**Рис. 2.** Волновое поле проходящих волн для пористых образцов мощностью:

$a$  – 8,4 мм;  $b$  – 15,1 мм.  $P_{fast}$  – быстрая,  $P_{sl}$  – медленная и  $P_{fast-1}$  – быстрая кратная продольные волны;  $S$  – поперечная волна;  $P_0$  – волна в воде (без пористого образца).

ная волна ( $P_{sl}$ ), которая прослеживается во всем диапазоне углов. Скорость медленной волны меньше скорости в воде, и при увеличении угла время вступления уменьшается. На сейсмограмме можно проследить еще следующие кратности быстрой волны (на рисунке они не обозначены). Интенсивности быстрой продольной волны и ее кратных быстро падают с увеличением угла падения, что обусловлено двумя факторами: очень сильным преломлением этих волн и выходом их за область чувствительности приемника. В средней части диапазона углов выделяется поперечная волна ( $S$ ), точнее сказать, дважды обменная поперечная волна.

Прежде чем переходить к обсуждению параметров, характеризующих пористую флюидонасыщенную среду, запишем динамические уравнения, в которых эти параметры фигурируют.

**Уравнения движения.** Динамические уравнения движения пористой флюидонасыщенной среды описываются уравнениями Био, которые для скоростей смещения  $\mathbf{v}$  – скелета и  $\mathbf{w}$  – жидкости относительно скелета ( $\mathbf{w} = \phi(\mathbf{V} - \mathbf{v})$ , где  $\mathbf{V}$  – скорость смещения жидкости и  $\phi$  – пористость) имеют вид [6]

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = (\rho \dot{v}_i + \rho_f \dot{w}_i), \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\eta}{k} \mathbf{F} w_i + (\rho_f \dot{v}_i + m \dot{w}_i), \quad (2)$$

где  $\rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi\rho_f$ ;  $\rho_s$  и  $\rho_f$  – плотности материалов зерен и жидкости соответственно;  $\eta$  – вязкость;  $k$  – низкочастотная проницаемость;  $\mathbf{F}$  – оператор по времени, характеризующий изменение проницаемости с частотой;  $m = \frac{\rho_f \alpha}{\phi}$ ,  $\alpha$  – коэффициент извилистости пор;  $\dot{\tau}_{ij}$  – компоненты полного тензора напряжения в

пористой насыщенной среде;  $p$  – давление в жидкости даются выражениями:

$$\dot{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \left[ \lambda_c \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + \left( 1 - \frac{K}{K_s} \right) M \frac{\partial w_k}{\partial x_k} \right], \quad (3)$$

$$\dot{p} = \left( 1 - \frac{K}{K_s} \right) M \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + M \frac{\partial w_k}{\partial x_k}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\varphi}{K_f} + \frac{(1 - \varphi - K / K_s)}{K_s}. \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_c$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламэ флюидонасыщенной среды;  $K$ ,  $K_s$  и  $K_f$  – объемные модули (сухой) твердой матрицы, материала зерен и жидкости. По повторяющимся индексам в уравнениях происходит суммирование.

При переходе в частотную область применение оператора  $\mathbf{F}$  приводит к частотно-зависимой проницаемости (динамической проницаемости)  $\tilde{k}(\omega) = k/F(\omega)$ . Комплексная функция частоты  $F(\omega)$ , называемая функцией коррекции, учитывает отклонение от ламинарного течения.

**Граничные условия.** Условия на проницаемой границе двух пористых флюидонасыщенных сред [7, 8] включают в себя равенство нормальной и тангенциальной составляющих напряжений  $\tau$ , равенство давлений в жидкостях, равенство скоростей скелетов и баланс массы жидкости. Запишем эти условия, полагая что нормаль совпадает с осью  $Z$  и касательная – с осью  $X$ :

$$\begin{aligned} \tau_{zz}^+ &= \tau_{zz}^-; & \tau_{xz}^+ &= \tau_{xz}^-; & p^+ &= p^-; \\ v_z^+ &= v_z^-; & w_x^+ &= w_x^-; & v_x^+ &= v_x^-. \end{aligned} \quad (6)$$

Перепишем эти условия для проницаемой границы между пористой флюидонасыщенной средой и жидкостью. Жидкости будет соответствовать правая часть граничных условий (6). В первом равенстве правая часть заменится на давление со знаком минус в соответствии с общепринятыми обозначениями, а во втором – правая часть будет равна нулю. Условие равенства давлений в жидкостях останется без изменений. Два уравнения – условие непрерывности нормальной компоненты скорости смещения скелета (четвертое уравнение) и баланс масс (пятое уравнение) – перейдут в одно условие баланса масс. Слева – относительно границы скелета протекает  $w_z^+ = \varphi(V_z^+ - v_z^+)$  жидкости, а справа –  $V_z^- - v_z^-$ . Приравнявая эти два выражения и перенося  $v_z^+$  в левую часть, получим:  $v_z^+ + w_z^+ = V_z^-$ . И наконец последнее условие нужно опустить. Таким образом, окончательно вместо шести граничных условий (6) получаем четыре:

$$\tau_{zz}^+ = -p^-; \quad \tau_{xz}^+ = 0; \quad p^+ = p^-; \quad v_z^+ + w_z^+ = V_z^-. \quad (7)$$

Теперь в этой системе граничных условий справа (в чисто жидкой среде) остались только давление и нормальная компонента вектора смещения, связанные известными соотношениями.

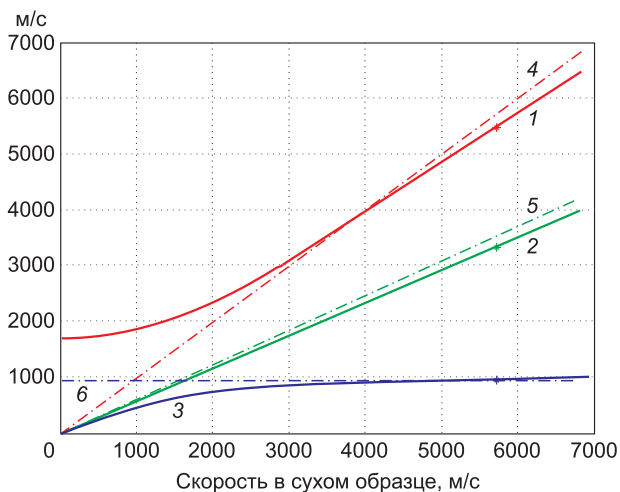
**Результаты экспериментов.** Обработка сейсмограмм при нескольких значениях мощностей слоев позволила с большей точностью определить скорости и декременты поглощения волн. Отношение амплитуд волн для разных мощностей позволяло определить поглощение, не используя коэффициенты прохождения.

Существенное значение для скоростей и поглощения волн имеет характеристическая частота  $\omega_c = \varphi\zeta/\rho_f k$ . Эта частота для приведенных параметров равна  $2\pi \cdot 5,6$  кГц. Частотный состав зарегистрированных волн находится в интервале от 100 до 600 кГц, что значительно выше характеристической частоты. В этой области скорости волн практически не зависят от частоты. Зависимость поглощения от частоты определяется функцией  $F(\omega)$ , для которой удобно воспользоваться аппроксимацией [9]  $F(\omega) = ia\sqrt{\omega/\omega_c}$  при  $\omega \gg \omega_c$ , где  $a$  – структурный множитель. Такая зависимость приводит к тому, что декременты поглощения обратно пропорциональны квадратному корню из частоты.

Параметры образцов, насыщенных водой, имеют следующие значения: для быстрой продольной волны скорость  $V_{fast} = 5,40 \pm 0,15$  км/с и декремент поглощения  $\theta_{fast} < 0,02$ ; для медленной продольной волны скорость  $V_{sl} = 0,96 \pm 0,01$  км/с и декремент поглощения  $\theta_{sl} = 0,18 \pm 0,01$  (при 500 кГц) и для поперечной волны:  $V_s = 3,3 \pm 0,06$  км/с и  $\theta_s < 0,02$ .

Декременты поглощения быстрой продольной и поперечной волны довольно малы и близки к значениям в сухих образцах. Изменение мощности образцов составляло около одной-двух длин волны для этих волн, и это позволило определить только верхний предел добротностей. Декремент поглощения медленной волны с наибольшей точностью определяется для видимой частоты (500 кГц). Для определения частотной зависимости декремента поглощения требуется выделить временное окно достаточного размера для спектрального разложения, в котором присутствует импульс только одной из волн. Расчеты показали, что размеры окон не достаточные для уверенного определения частотной зависимости поглощения.

Измеренные значения скоростей волн в сухой и водонасыщенной среде позволили подобрать параметры Био, которые экспериментально не измеряются. Значения скоростей вычисляются как собственные значения уравнений (1), (2). Эти формулы известны и их ввиду громоздкости и малой наглядности приводить не будем, а приведем график зависимости скоростей волн от скорости продольной волны в сухом образце, на который нанесем точки, соответствующие измеренным значениям скоростей волн в водонасыщенной среде (рис. 3). Этот рисунок отличается от приведенного Т. Plova [10] масштабом по оси  $X$ ; зависимость от скорости в сухом образце, на наш взгляд, является более наглядной. Пунктирными линиями на графике показаны значения скоростей волн для сухого образца. Отношение скорости поперечной волны к продольной считалось постоянным и равным значению для сухих образцов. Скорость поперечной волны в водонасыщенной среде всегда ниже, чем в сухой, что связано с увеличением плотности, обусловленной частью присоединенной массы жидкости. Присоединенная масса жидкости пропорциональна величине  $\varphi\zeta(1 - 1/\alpha)$ . По этой же причине скорость быстрой волны для очень жесткого скелета (при скорости более 3500 м/с) ниже скорости продольной волны в сухой среде. При скорости около 3500 м/с эффект присоединенной массы компенсируется более повышенным значением модуля упругости водонасыщенной среды по сравнению с сухой, и скорости в этих средах равны. При скорости менее 3500 м/с все большую роль играет сжимаемость жидкости –



**Рис. 3.** Скорости волн в флюидонасыщенной среде в зависимости от скорости продольной волны в сухой среде:

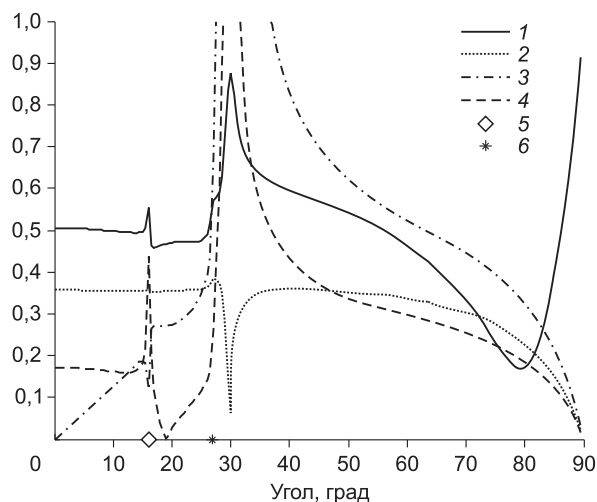
1 – быстрой, 2 – поперечной, 3 – медленной волн, 4 – для быстрой и 5 – поперечной их значения в сухой среде, а для медленной (6) волны асимптотика.

среда становится суспензией. Скорость медленной волны (с ростом скорости в сухой среде) возрастает от нуля и стремится к своей асимптотике  $\sqrt{K_f/\alpha\rho}$  для очень жесткого скелета, значение которой в основном и позволяет определить неизвестный параметр извилистости  $\alpha$ .

Методом подбора по данным скоростей и декрементов поглощения получены неизвестные параметры Био:  $\alpha = 2,50 \pm 0,05$  – параметр извилистости пор и  $a = 5,1 \pm 0,1$  – структурный коэффициент.

Итак, все параметры уравнений движения (1), (2) определены, и можно вычислить коэффициенты отражения и прохождения волн на границе пористого слоя и жидкости, определяемые условиями (7). Для вычисления коэффициентов отражения и прохождения необходимо найти выражения для скоростей смещения волн через скорость смещения скелета  $\mathbf{v}$  и относительного смещения жидкости  $\mathbf{w}$ , т. е. вычислить собственные значения векторов уравнений движения. В области высоких частот ( $\omega \gg \omega_c$ ) плоская быстрая волна кроме скорости смещения скелета  $\mathbf{v}$  включает небольшую добавку скорости смещения жидкости  $\mathbf{w}$  относительно скелета и, соответственно наоборот, медленная волна в основном состоит из разнонаправленного смещения жидкости и скелета  $\mathbf{w} = \varphi(\mathbf{V} - \mathbf{v})$ , но включает небольшую добавку скорости смещения скелета. Поперечная волна также имеет составляющую  $\mathbf{w}$ . Амплитуды волн комплексны, и получаемые коэффициенты отражения и прохождения также комплексны. Из-за громоздкости выражений теряется наглядность, поэтому расчеты для коэффициентов представлены в виде графиков, на которых приведены абсолютные значения коэффициентов отражения и прохождения при частоте 500 кГц.

Коэффициенты отражения прохождения выражены через угол падающей волны из жидкости (он же угол выхода волны в жидкость), для которого имеется два критических угла: для быстрой продольной волны  $\theta_{\text{fast}} = \arcsin(V_f/V_{\text{fast}}) = 16^\circ$  и для поперечной волны



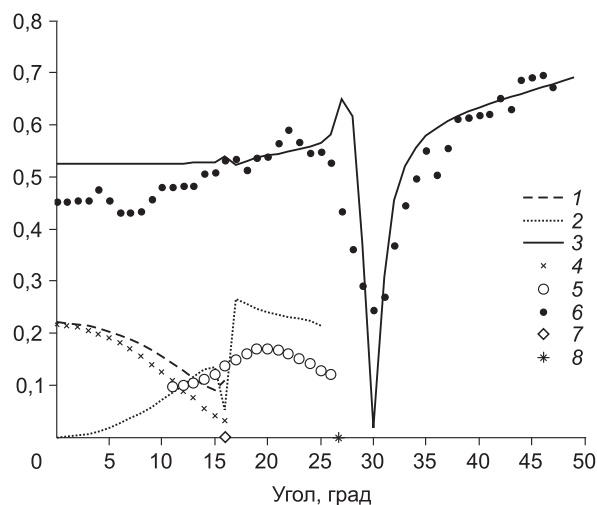
**Рис. 4.** Модули коэффициентов отражения и прохождения (обмена) при падении плоской волны из жидкости на границу пористой флюидонасыщенной среды:

1 – отраженной; проходящих продольных: 2 – медленной и 4 – быстрой; 3 – обменной. Критические углы: 5 – быстрой продольной и 6 – поперечной волны.

$\theta_S = \arcsin(V_f/V_S) = 27^\circ$ . Значения этих критических углов на рис. 4, 5 указаны звездочками.

На рис. 4 представлены результаты расчета абсолютных значений коэффициентов отражения и прохождения для случая падения плоской волны из жидкости на границу с пористым полупространством. Не показанные здесь реальные части коэффициентов при малых углах близки к абсолютным значениям, кроме коэффициента отражения, для которых он имеет отрицательные значения, что соответствует отражению от акустически более жесткой границы.

При просвечивании пористого слоя происходит обмен волн на двух границах, поэтому результирующие коэффициенты прохождения являются результа-



**Рис. 5.** Модули коэффициентов прохождения (обмена) через слой пористой водонасыщенной среды (теоретический расчет):

1 – для быстрой, 2 – для поперечной и 3 – медленной волн; результаты эксперимента: 4 – для быстрой, 5 – поперечной и 6 – медленной волн. Критические углы: 7 – быстрой и 8 – поперечной волн.

том произведения коэффициентов обмена на каждой границе. В численных расчетах проверялось влияние кратных волн на амплитуды однократно прошедших волн. Это влияние очень незначительно и проявляется только вблизи критических углов. Поэтому коэффициенты вычислялись для однократно прошедших волн. Коэффициенты прохождения через слой для трех наблюдаемых волн приведены на рис. 5, а также результаты эксперимента для образца мощностью 15,1 мм и видимой частоты 500 кГц. Поглощение быстрой и поперечной волны незначительно и не учитывалось. Для медленной волны в экспериментальные значения вводилась поправка, компенсирующая поглощение.

Для быстрой волны теоретические и экспериментальные значения совпадают при малых углах, а при приближении к критическому углу (около 17°) экспериментальные значения меньше теоретических. Это связано с сильным преломлением быстрой волны и уходом ее за пределы размера приемника.

Для поперечной волны теоретические и экспериментальные значения близки в диапазоне углов от 10 до 17°. При меньших углах интенсивность поперечной волны мала и, кроме того, она интерферирует с быстрой волной, поэтому при малых углах экспериментальные значения не определялись. В области углов от критического быстрой (17°) и до критического поперечной (27°) волны экспериментальные значения ниже теоретических. Необходимо отметить, что из-за интерференции поперечной волны с быстрой при малых углах и сильного преломления при больших углах трудно ожидать количественного совпадения теоретических и экспериментальных значений коэффициентов прохождения. Поэтому приведенные экспериментальные значения носят иллюстративный характер.

Общий характер зависимости экспериментальных и теоретических коэффициентов прохождения для медленной волны совпадает. При малых углах отличие (около 20 %) обусловлено изменением амплитуд за счет наложения кратных быстрых волн. В области резкого изменения коэффициента отражения (около 30°) экспериментальные значения более сглажены, и положение минимума одинаково в теоретических и экспериментальных данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация волновых полей, проходящих волн через искусственные пористые флюидонасыщенные образцы различной мощности позволила определить скорости и декременты быстрой, медленной и попе-

речной волн. Это дало возможность вычислить все параметры Био и рассчитать зависимости коэффициентов отражения–прохождения на границе пористой среды и жидкости.

Впервые проведено сравнение теоретических и экспериментально полученных коэффициентов прохождения для быстрой и медленной продольных и поперечной волн через пористый водонасыщенный слой. Сравнение выполнено в диапазоне углов падения от 0 до 47° и показало удовлетворительное согласие данных эксперимента и теоретического расчета, что подтверждает теорию Био с точки зрения динамики волн. Это говорит о необходимости внедрения теории Био в теорию и практику обработки и интерпретации сейсмических данных.

#### Литература

1. **Френкель Я.И.** К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1944. Т. VIII, № 4. С. 133–149.
2. **Biot M.A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Pt. I, II // J. Acoust. Soc. Amer. 1956. V. 28. P. 168–191.
3. **Plona T.J.** Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36(4). P. 259–261.
4. **Kelder O., Smeulders D.M.J.** Propagation and damping of compressional waves in porous rocks: theory and experiments // Ann. Internat. Mtg. 64th Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists: Expanded Abstracts. 1995. P. 675–678.
5. **Программно-аппаратурный комплекс “Эхо-1” для ультразвукового сейсмического моделирования: Метод. рекомендации / Сост.: Б.А. Бобров, Л.Д. Гик, Н.М. Держи, Ю.А. Орлов.** Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1984. 124 с.
6. **Biot M.A.** Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // J. Appl. Phys. 1962. V. 33, N 4. P. 1482–1498.
7. **Deresiewicz H., Skalak R.** On uniqueness in dynamic poroelasticity // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1963. V. 53. P. 783–788.
8. **Gurevich B., Schoenberg M.** Interface conditions for poroelasticity // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105, N 5.
9. **Ляховицкий Ф.М., Юдасин Л.А.** Влияние порозаполнителя и пластовых условий на скорости и поглощение упругих волн в песчанике // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 4. С. 43–57.
10. **Jonhson D.L., Plona T.J.** Acoustic slow waves and the consolidation transition // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 72 (2). P. 556–564.