

УДК 532.546:534.1

ВОЛНЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ СО СЛОЕМ, СОДЕРЖАЩИМ ГАЗОВЫЙ ГИДРАТ

А. А. Губайдуллин^{*,**}, О. Ю. Болдырева^{*}

^{*} Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 625026 Тюмень, Россия

^{**} Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия
E-mails: A.A.Gubaidullin@yandex.ru, olga.boldyreva@mail.ru

Проведено моделирование распространения гармонических и импульсных волн в слоистой пористой среде, один из слоев которой содержит газовый гидрат. Показано, что полученная волновая картина позволяет прогнозировать наличие гидрата в слое и его толщину, если при этом выполнены термобарические условия существования газового гидрата.

Ключевые слова: пористая среда, газовый гидрат, волны, отражение.

DOI: 10.15372/PMTF20200404

Введение. Исследование свойств акустических волн в пористых средах актуально в связи с их многочисленными приложениями, например для определения упругих свойств окружающего пространства [1–3]. В частности, в геофизике акустические волны используются для определения характеристик водонасыщенных и углеводородных пластов. При этом возникает необходимость интерпретации сейсмограмм, описывающих отражение волн от слоев в горной породе. В последнее время опубликован ряд работ, посвященных изучению процессов отражения, преломления и распространения акустических волн в слоистых средах [4–7]. Рассмотрена эволюция волнового импульса при прохождении через пористую преграду, расположенную в газе и насыщенную тем же газом [4], а также отражение и преломление акустического импульса на расположенном в жидкости пористом слое в зависимости от угла падения [5]. Исследованы процессы прохождения импульса конечной длительности через границу раздела сред чистый газ — пористая среда и его отражения от жесткой стенки за пористым слоем [6]. Решена задача о преломлении упругих волн на границе двух полупространств (горных пород), заполненных несмешивающимися флюидами [7]. Наибольший интерес представляет исследование слоев, содержащих газовый гидрат. В [1–3] показано, что прохождение и отражение сигнала при пересечении границ в большинстве случаев можно рассматривать в линейном одномерном приближении.

Постановка и метод решения задачи. Рассмотрим задачу о распространении плоских волн в пористой среде с гидратосодержащим слоем (рис. 1). Промежуточный слой 2 содержит газовый гидрат, при этом свойства слоев 1 и 3 могут различаться).

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (код проекта АААА-А17-117030610130-1).

© Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., 2020

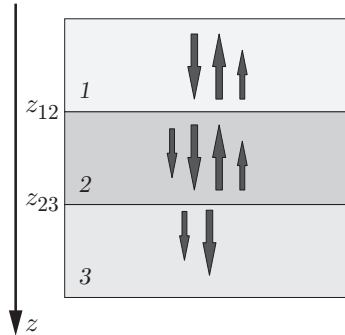


Рис. 1. Схема прохождения быстрой (большие стрелки) и медленной (маленькие стрелки) волн через границы участков пористой среды и отражения от них

Для исследования распространения и затухания волн в пористой среде выбрана двухскоростная модель насыщенной пористой среды [8, 9]. Будем полагать, что в содержащем газогидрат слое пористой среды скелет состоит из основной горной породы, цементированной газовым гидратом, и моделируется однородной твердой фазой с эффективными параметрами.

Уравнения сохранения масс и импульсов фаз имеют вид

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla^l (\rho_f v_f^l) = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^l (\rho_s v_s^l) = 0,$$

$$\rho_f \frac{d_f v_f^k}{dt} = -\alpha_f \nabla^k p_f - F^k, \quad \rho_s \frac{d_s v_s^k}{dt} = -\alpha_s \nabla^k p_f + \nabla^l \sigma_{s*}^{lk} + F^k,$$

где ρ_j , v_j , α_j — приведенные плотность, скорость, объемная доля j -й фазы; σ_{s*} , p_f — приведенное напряжение в скелете и давление во флюиде соответственно; $j = s, f$.

Выражение для межфазной силы имеет вид суммы сил присоединенных масс F_m , вязкого трения F_μ и силы Бассэ F_B :

$$F = F_m + F_\mu + F_B, \quad F_m = \frac{1}{2} \eta_m \alpha_s \alpha_f \rho_{f0}^\circ \left(\frac{d_f v_f}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right),$$

$$F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_f \mu_f a_{s*}^{-2} (v_f - v_s), \quad F_B = \eta_B \alpha_s \alpha_f a_{s*}^{-1} \sqrt{2 \rho_{f0}^\circ \mu_f \omega} (v_f - v_s).$$

Здесь ρ_j° — истинная плотность; a_{s*} — характерный размер зерен скелета; μ_f — вязкость флюида; η_m , η_μ , η_B — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Скелет пористой среды будем полагать упругим с модулями упругости λ_{s*} , μ_{s*} :

$$\sigma_{s*}^{kl} = \alpha_s (\lambda_{s*} \delta^{kl} \varepsilon_s^{mm} + 2\mu_{s*} \varepsilon_s^{kl} + \nu_{s*} \delta^{kl} p_f), \quad \nu_{s*} = \frac{\lambda_{s*} + 2\mu_{s*}/3}{\lambda_s + 2\mu_s/3},$$

$$\frac{\partial_s \varepsilon_s^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{2} (\nabla^k v_s^l + \nabla^l v_s^k).$$

Для каждой фазы выполняется линейное уравнение состояния в акустическом приближении:

$$p_j - p_{j0} = K_j \frac{\rho_j^\circ - \rho_{j0}^\circ}{\rho_{j0}^\circ}, \quad j = s, f,$$

где нижний индекс 0 соответствует невозмущенному значению величины; K_j — объемные модули упругости для материала j -й фазы; p_s — истинное давление в твердой фазе.

Для замыкания системы уравнений используем соотношения между истинными давлениями в фазах p_f , p_s и эффективным давлением в скелете p_{s*} :

$$p_{s*} = \alpha_s(p_s - p_f), \quad p_{s*} = -\sigma_{s*}^{mm}/3, \quad \alpha_s + \alpha_f = 1, \quad \rho_j = \alpha_j \rho_j^0, \quad j = s, f.$$

Для содержащего газовой гидрат слоя используем среднеобъемные значения плотности и модулей упругости твердой фазы и скелета пористой среды.

Для каждого слоя пористой среды указанная система уравнений линейризуется и решение ищется в виде гармонической волны с частотой ω . Находится дисперсионное соотношение, выражающее зависимость волнового числа от частоты и позволяющее рассчитать скорости и затухание распространяющихся в данной среде гармонических волн. Известно, что в пористой среде возможно распространение продольных волн двух типов: деформационной (быстрой) и фильтрационной (медленной), при этом фильтрационная волна быстро затухает и скорость ее распространения при низких частотах мала. При падении на границу раздела волны любого типа (быстрой или медленной) в обеих средах возникают прошедшие и отраженные волны — как быстрые, так и медленные. Образование прошедших и отраженных волн при прохождении быстрой волны из слоя 1 в слой 2 и далее в слой 3 показано на рис. 1. На границу слоя z_{12} падает быстрая волна. В слое 1 возникают быстрая и медленная отраженные волны. В слое 2 также образуются прошедшие и отраженные от слоя 3 быстрые и медленные волны, а в слое 3 — только прошедшие быстрые и медленные волны.

На каждой границе z_{12} , z_{23} зададим условия непрерывности полных напряжений, давлений во флюиде, скорости частиц скелета, а также потока флюида. В случае двух границ эти условия представляют собой восемь уравнений, при этом количество уравнений равно количеству возникающих волн. Подставим в указанные граничные условия решение для каждой среды в виде линейной комбинации быстрых (нижний индекс “(1)”) и медленных (нижний индекс “(2)”) волн в прямом и обратном направлениях:

$$w = A_{w(1)} e^{i(\omega t - k_{(1)} z)} + A_{w(2)} e^{i(\omega t - k_{(2)} z)} + \tilde{A}_{w(1)} e^{i(\omega t + k_{(1)} z)} + \tilde{A}_{w(2)} e^{i(\omega t + k_{(2)} z)}$$

($k_{(1)}$, $k_{(2)}$ — комплексные волновые числа; i — мнимая единица; $A_{w(1)}$, $A_{w(2)}$ — амплитуды). В результате получаем систему линейных уравнений относительно амплитуд возникающих волн. Решая численно полученную систему уравнений при $z = z_{12}$, $z = z_{13}$, находим значения коэффициентов отражения R_{12} , R_{23} на этих границах для любой заданной частоты.

В настоящей работе будем рассматривать коэффициенты R_{12} , R_{23} , соответствующие отношению амплитуд отраженной и падающей быстрых волн, в случае падения на границу быстрой волны, так как медленная волна распространяется с существенно меньшей скоростью и быстрым затуханием. Поэтому большое практическое значение имеет регистрация сигнала, представляющего собой отраженную быструю волну. Тем не менее при расчете коэффициентов отражения R_{12} , R_{23} для быстрых волн также будем учитывать возникновение в этом процессе медленных волн.

В рамках линейной теории коэффициент отражения R от слоя 2 толщиной h_2 можно определить по формуле [2, 3], учитывающей его зависимость от толщины слоя:

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-2ik_2 h_2}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-2ik_2 h_2}}.$$

Результаты расчетов. Для каждого слоя пористой среды были рассчитаны дисперсионные зависимости, на основе которых получены коэффициенты отражения и прохождения волн через границы двух сред с различными свойствами, а также рассчитан коэффициент отражения от слоя, содержащего газовой гидрат. При этом рассматривались варианты насыщения слоев пористой среды жидкостью или газом. Изучено влияние

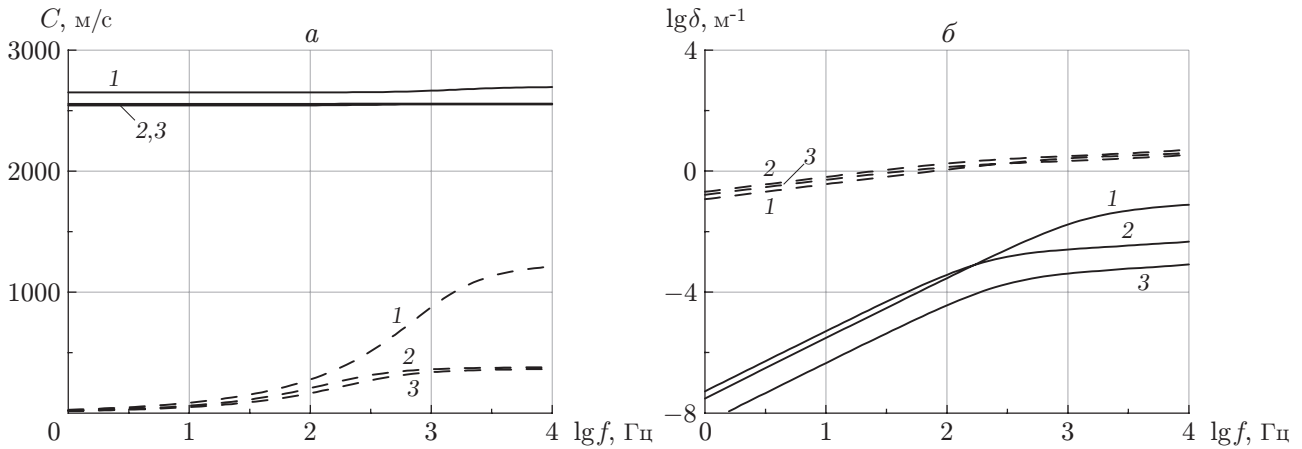


Рис. 2. Зависимости фазовой скорости C (а) и линейных декрементов затухания δ (б) от частоты колебаний быстрой (сплошные линии) и медленной (штриховые линии) продольных волн в различных слоях пористой среды:
1 — слой, насыщенный водой, 2 — слой, насыщенный газогидратом и метаном, 3 — слой, насыщенный метаном

характеристик слоя (гидратонасыщенности, типа насыщающего флюида) на значение коэффициента отражения.

Расчеты проводились при следующих значениях основных параметров пористых сред. Для всех слоев пористость равна 0,4, $a_{s*} = 0,1$ мм, $\eta_m = 0,5$, $\eta_\mu = 100$, $\eta_B = 1,5$, основной материал скелета — кварц с параметрами $\rho_{s0}^o = 2760$ кг/м³, $K_s = 36,6$ ГПа, $\lambda_{s*} = \mu_{s*} = 6$ ГПа, насыщающий флюид — вода либо метан с параметрами $\rho_{f0}^o = 47,3$ кг/м³, $K_f = 8$ МПа при $p_0 = 6$ МПа, $T_0 = 280$ К; для слоя 2 использовались среднеобъемные значения плотности и модулей упругости скелета, состоящего из кварца и гидрата, гидратонасыщенность принималась равной $s_h = 0,8$, $\alpha_f = 0,08$, $\alpha_s = 0,92$; для гидратной части скелета $\rho_{h0}^o = 910$ кг/м³, $K_h = 6,41$ ГПа, $\lambda_{h*} = \mu_{h*} = 3$ ГПа.

На рис. 2 приведены зависимости фазовой скорости и линейных декрементов затухания быстрой и медленной продольных волн от частоты колебаний в каждом слое пористой среды. Гидратонасыщенность в слое 2 равна $s_h = 0,8$. Видно, что скорость распространения быстрой волны в слоях 2, 3, насыщенных метаном, меньше скорости в слое 1, насыщенном водой.

На рис. 3 приведены рассчитанные зависимости коэффициентов отражения волн R_{12} , R_{23} от границ z_{12} , z_{23} и коэффициента отражения волн R от гидратонасыщенного слоя в пористой среде от частоты колебаний. Гидратонасыщенность в слое 2 составляет $s_h = 0,8$, толщина слоя равна 2 и 5 м. Слой 1 насыщен водой, слои 2 и 3 — газом (метаном). Заметим, что $\text{Re}(R_{12}) < 0$, $\text{Re}(R_{23}) < 0$, $\text{Im}(R_{12}) \approx 0$, $\text{Im}(R_{23}) \approx 0$, поскольку отражение на границах z_{12} , z_{23} происходит от более мягкой среды с меньшим акустическим сопротивлением. При низких частотах (длина волны $\lambda > 2h_2$) коэффициент отражения от слоя равен $R \approx R_{12} + R_{23}$. На рис. 3 также видно, что коэффициент отражения от слоя R является периодической функцией частоты с периодом, зависящим от толщины слоя. Это обусловлено интерференцией волн, отраженных от первой и второй границ. При сложении отраженных от первой и второй границ волн в зависимости от длины волны может наблюдаться как их усиление ($R \approx R_{12} + R_{23}$) в случае их прихода в одинаковой фазе, так и ослабление ($R \approx 0$) в случае их прихода в противоположных фазах.

На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов отражения от границ и от слоя от частоты колебаний в случае, когда все три слоя насыщены метаном либо водой. При

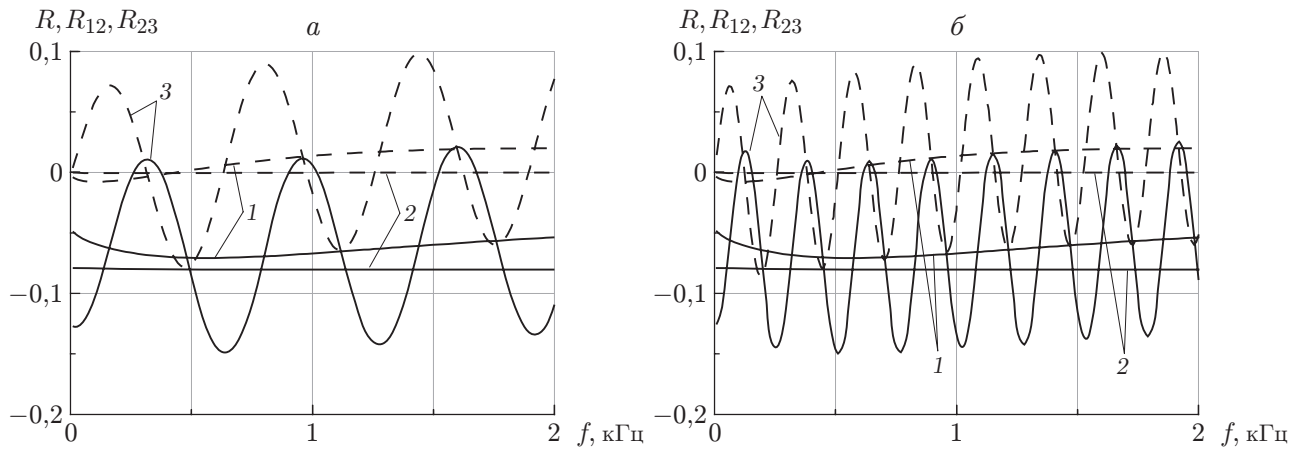


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от границ R_{12} (1), R_{23} (2) и от гидратонасыщенного слоя R (3) от частоты колебаний в пористой среде при $s_h = 0,8$ и различной толщине слоя:
 а — $h_2 = 2$ м, б — $h_2 = 5$ м; 1 — слой, насыщенный водой, 2 — слой, насыщенный газогидратом и метаном, 3 — слой, насыщенный метаном; сплошные линии — действительные части коэффициентов отражения, штриховые — мнимые

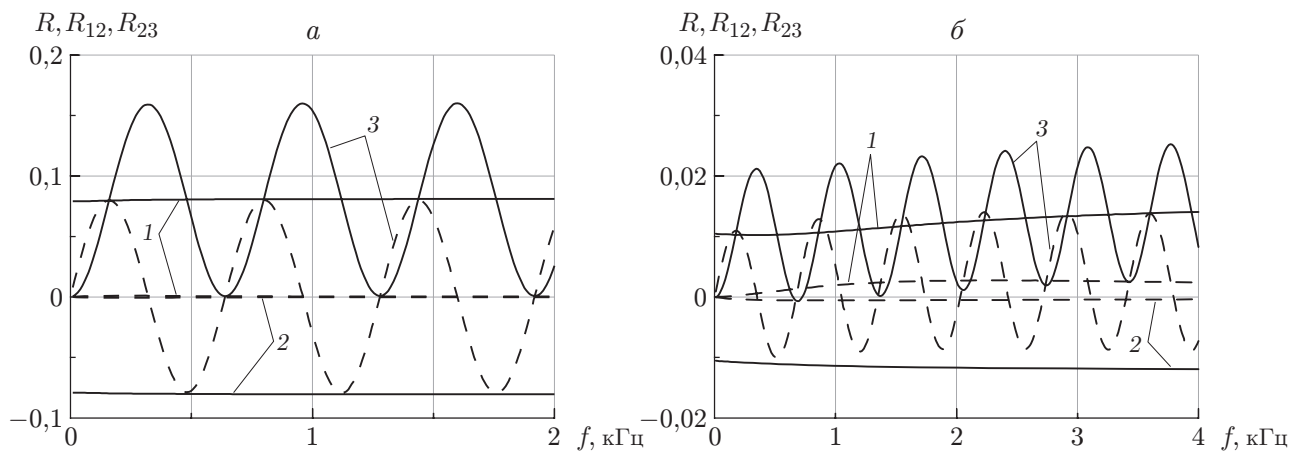


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от границ R_{12} (1), R_{23} (2) и от гидратонасыщенного слоя R (3) от частоты колебаний в пористой среде при $s_h = 0,8$ в слое 2 ($h_2 = 2$ м):
 а — слой, насыщенные метаном, б — слой, насыщенные водой; сплошные линии — действительные части коэффициентов отражения, штриховые — мнимые

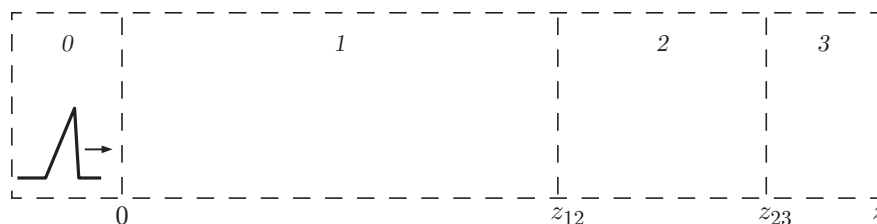


Рис. 5. Схема задачи о распространении волны давления в пористой среде, содержащей слой, частично заполненный газовым гидратом:

0 — флюид, 1–3 — слои пористой среды, 2 — слой, содержащий газовый гидрат

этом $R_{23} = -R_{12}$. В случае насыщения всех трех слоев водой акустические жесткости различаются несущественно, поэтому от первой границы и от всего слоя отражается лишь незначительная часть исходной волны.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что в случае если все три слоя являются водонасыщенными, на обеих границах коэффициент отражения близок к нулю. В случае если слой 1 является водонасыщенным, а слой 2 или слои 2, 3 насыщены газом, происходит отражение исходного сигнала с инверсией фазы, т. е. сжатие переходит в разрежение, и наоборот. Поскольку в природных пластах содержащие газовый гидрат пропластки обычно являются газонасыщенными и залегают ниже водонасыщенных, такое отражение может свидетельствовать о наличии гидрата. Анализ зависимости коэффициента отражения R от частоты колебаний f позволяет оценить толщину гидратосодержащего слоя.

Для визуализации процесса отражения и прохождения волн в слоистой пористой среде проведено численное исследование распространения импульсных волн давления в рамках трехскоростной модели гидратосодержащей пористой среды [10]. Расчет выполнялся с использованием конечно-разностного метода.

На рис. 5 показана схема задачи. Все слои пористой среды насыщены метаном, начальные значения параметров пористой среды (скелета, газа) такие же, как на рис. 4. Начальный колоколообразный импульс давления задается во флюиде перед входом в пористую среду ($z < 0$ — флюид, $z \geq 0$ — пористая среда), газовый гидрат содержится в области $10 \text{ м} \leq z \leq 12 \text{ м}$, в расчетах использовались значения гидратонасыщенности в слое $s_h = 0; 0,5; 0,8$.

На рис. 6 показаны профили безразмерного полного напряжения при распространении импульса в пористой среде с гидратосодержащим слоем ($s_h = 0,8$) для различных значений времени. При $t = 2, 3, 4$ мс за деформационной волной наблюдается фильтрационная волна, которая имеет небольшую амплитуду и быстро затухает по мере распространения. Видно, что на границе с гидратосодержащим слоем ($z_{12} = 10 \text{ м}$, $t = 4,5; 5,0$ мс) формируется и начинает распространяться отраженная волна сжатия. Также наблюдается волна разрежения, отраженная от второй границы ($z_{23} = 12 \text{ м}$, $t = 5,5$ мс) и проходящая в противоположном направлении через границу z_{12} .

На рис. 7 представлена расчетная осциллограмма полного напряжения, записанная в точке $z = 8 \text{ м}$ при различных значениях s_h . Результаты расчета при $s_h = 0,8$ соответствуют результату расчета, представленному на рис. 6. На рис. 7 можно проследить исходную волну сжатия, отраженную от первой границы z_{12} волну сжатия, а также отраженную от второй границы z_{23} и прошедшую через первую границу волну разрежения.

Заключение. Результаты расчетов отражения и прохождения акустических волн в пористой среде при наличии в ней слоя, содержащего газовый гидрат, показывают, что, в случае если участок перед слоем является водонасыщенным, а гидратосодержащий слой

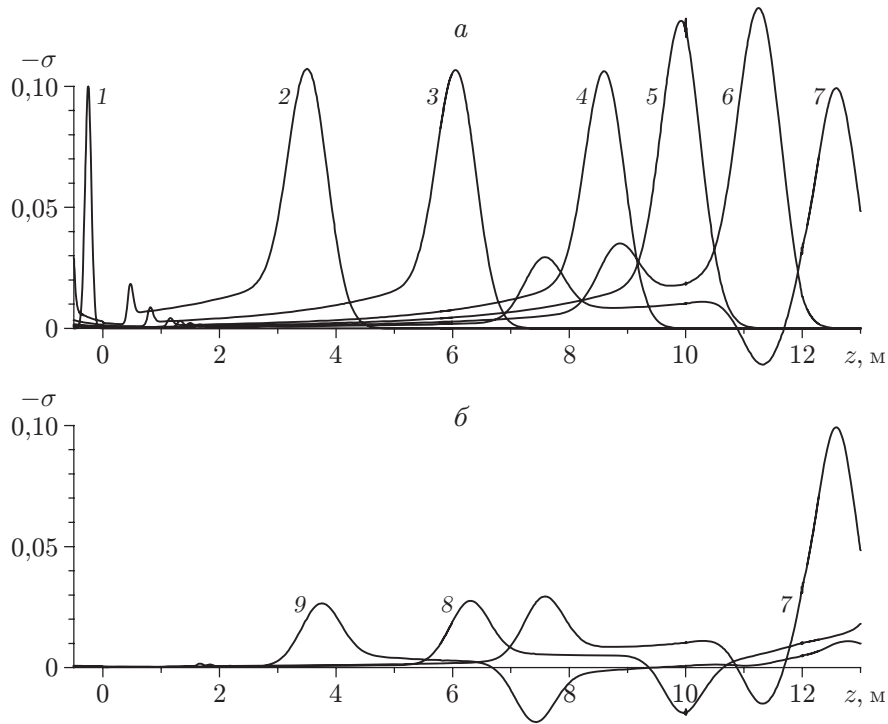


Рис. 6. Профили полного напряжения при распространении импульса давления в насыщенной метаном пористой среде со слоем, содержащим гидрат, в различные моменты времени:

a — $t = 0 \div 5,5$ мс, b — $t = 5,5 \div 7,0$ мс; 1 — $t = 0$, 2 — $t = 2,0$ мс, 3 — $t = 3,0$ мс, 4 — $t = 4,0$ мс, 5 — $t = 4,5$ мс, 6 — $t = 5,0$ мс, 7 — $t = 5,5$ мс, 8 — $t = 6,0$ мс, 9 — $t = 7,0$ мс

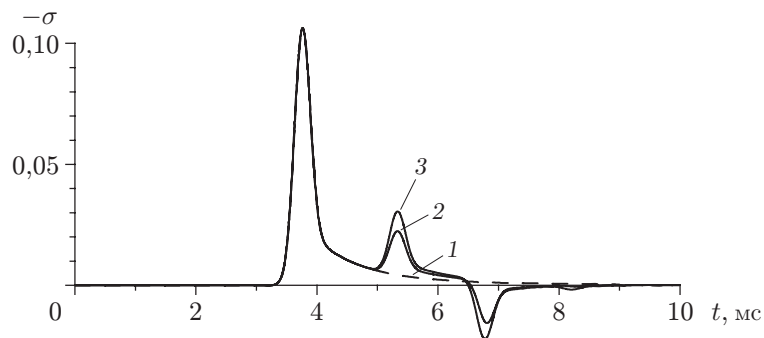


Рис. 7. Расчетная осциллограмма полного напряжения в насыщенной метаном пористой среде при отражении импульса давления от слоя, содержащего газовый гидрат, при $z = 8$ м и различных значениях гидратонасыщенности слоя 2: 1 — $s_h = 0$, 2 — $s_h = 0,5$, 3 — $s_h = 0,8$

или этот слой и слой за ним насыщены газом, отражение исходного сигнала происходит с инверсией фазы, т. е. сжатие переходит в разрежение, и наоборот. В природных пластах содержащие газовый гидрат пропластки, как правило, являются газонасыщенными и залегают ниже водонасыщенных, поэтому такое отражение может свидетельствовать о наличии газового гидрата, если при этом выполнены термобарические условия его существования. Анализ зависимости коэффициента отражения от слоя от частоты колебаний позволяет оценить толщину гидратосодержащего слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
3. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997.
4. Хусаинов И. Г., Дмитриев В. Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 5. С. 136–145.
5. Бордаков Г. А., Ильясов Х. Х., Миколаевский Э. Ю., Секерж-Зенькович С. Я. Расчет отражения и преломления акустического импульса пористым слоем в жидкости // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2000. Т. 40, № 2. С. 233–237.
6. Глазова Е. Г., Кочетков А. В. Моделирование взаимодействия ударной волны со слоем газопроницаемой гранулированной деформируемой среды // Пробл. прочности и пластичности. 2009. Вып. 71. С. 113–121.
7. Марков М. Г. Отражение упругих волн на границе раздела жидкостей в пористых средах // Физика Земли. 2009. № 9. С. 41–47.
8. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
9. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
10. Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н. Распространение волн в пористой среде, насыщенной газогидратом // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 48–52.

*Поступила в редакцию 20/IV 2020 г.,
после доработки — 20/IV 2020 г.
Принята к публикации 27/IV 2020 г.*
