Ольга Юрьевна БОЛДЫРЕВА[1]
Амир Анварович ГУБАЙДУЛЛИН[2]
Дина Николаевна ДУДКО[3]

УДК 532.546:534.1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИМ СЛОЕМ

[1] кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Тюменского филиала
Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
timms@ikz.ru

[2] доктор физико-математических наук, профессор
кафедры механики многофазных систем,
Тюменский государственный университет;
директор Тюменского филиала
Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
A.A.Gubaidullin@yandex.ru

[3] кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник Тюменского филиала
Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
timms@ikz.ru

Цитирование: Болдырева О. Ю. Численное исследование распространения волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем / О. Ю. Болдырева, А. А. Губайдуллин, Д. Н. Дудко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 210-221.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-210-221

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Аннотация

Проведено численное исследование особенностей распространения волн давления в цилиндрической полости в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат, с использованием двухскоростной, с двумя напряжениями модели пористой среды. Разработана методика численного решения двухмерной задачи о распространении возмущений в цилиндрической полости и окружающей ее пористой среде на основе метода Лакса — Вендроффа.

Полученные расчетные данные позволяют оценить коэффициенты отражения и прохождения сигнала на границах гидратосодержащего слоя внутри полости. Проанализировано влияние частоты сигнала, толщины содержащего гидрат слоя и его гидратонасыщенности на эволюцию волны давления внутри полости. Результаты численного исследования согласуются с полученными ранее результатами решения данной задачи в линейном приближении.

Результаты работы могут быть использованы при интерпретации данных геофизических исследований скважин для уточнения положения границ слоев, в частности гидратосодержащего слоя.

Ключевые слова

Пористая среда, волны, газовый гидрат, цилиндрический волновод, коэффициент отражения, слой, граница.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-210-221

Введение

В геофизике гидроволны (трубные волны) в скважинах применяются для определения таких механических свойств горных пород, как пористость, проницаемость, водо- или нефтенасыщенность и т. п. [4, 5]. Если скважина пересекает слои пласта с различными акустическими сопротивлениями, то возникают отраженные волны, которые несут информацию о характеристиках этих слоев. Целью настоящей работы является выявление особенностей волн давления в скважине при пересечении ею слоя, содержащего газовый гидрат. Исследование выполнено путем численного моделирования, в отличие от работ авторов [1, 6], где задача решена в линейном приближении.

Постановка задачи. Основные уравнения

Рассмотрим задачу о распространении возмущений в цилиндрическом волноводе в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат (см. рис. 1).

Для численного исследования особенностей распространения и затухания волн в такой системе будем использовать двухскоростную модель пористой среды [2, 3]. В слое пористой среды, содержащем газогидрат, скелет (основная порода + газовый гидрат) будем считать однородной твердой фазой с эффективными параметрами.

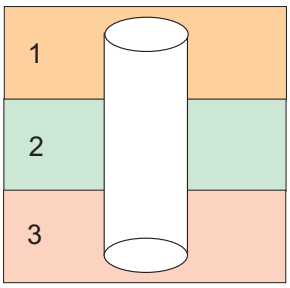


Рис. 1. Схема задачи. Слой 2 содержит газовый гидрат

Fig. 1. The objective scheme; layer 2 contains gas hydrate

Уравнения баланса массы и импульса фаз имеют вид [2, 3]:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla^l(\rho_f v_f^l) = 0, \qquad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^l(\rho_s v_s^l) = 0,$$
$$\rho_f \frac{d_f v_f^k}{dt} = -\alpha_f \nabla^k p_f - F^k, \tag{1}$$
$$\rho_s \frac{d_s v_s^k}{dt} = -\alpha_s \nabla^k p_f + \nabla^l \sigma_{s^*}^{lk} + F^k.$$

Здесь ρ_j, v_j, α_j — эффективная плотность, скорость и объемное содержание твердой ($j = s$) фазы и флюида ($j = f$); σ_{s*}, p_f — соответственно эффективное напряжение в скелете пористой среды и давление во флюиде.

Сила межфазного взаимодействия имеет вид суммы сил присоединенных масс F_μ и вязкого трения F_m [2, 3]:

$$F = F_m + F_\mu, \qquad F_m = \frac{1}{2}\eta_m \alpha_s \alpha_f \overset{\circ}{\rho}_{f0} \left(\frac{d_f v_f}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt}\right),$$
$$F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_f \mu_f a_{s^*}^{-2}(v_f - v_s). \tag{2}$$

Здесь ρ_j° — истинная плотность j-фазы, a_{s*} — характерный размер частиц скелета, μ_f — вязкость флюида, η_m, η_μ — зависящие от структуры среды коэффициенты.

Скелет пористой среды считаем упругим,

$$\sigma_{s^*}^{kl} = \alpha_s(\lambda_{s^*}\delta^{kl}\varepsilon_s^{mm} + 2\mu_{s^*}\varepsilon_s^{kl} + \nu_{s^*}\delta^{kl}p_f), \qquad \nu_{s^*} = \frac{\lambda_{s^*} + 2/3\mu_{s^*}}{\lambda_s + 2/3\mu_s},$$
$$\frac{\partial_s \varepsilon_s^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{2}(\nabla^k v_s^l + \nabla^l v_s^k), \tag{3}$$

где λ_{s*}, μ_{s*} — модули упругости, ε_s — деформации твердой фазы.

Уравнения состояния фаз приняты в акустическом приближении:

$$p_j - p_{j0} = K_j\left(\overset{\circ}{\rho}_j - \overset{\circ}{\rho}_{j0}\right)/\overset{\circ}{\rho}_{j0}, \tag{4}$$

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

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

$$p_{s*} = \alpha_s\left(p_s - p_f\right), \qquad p_{s*} = -\frac{1}{3}\sigma_{s*}^{mm}, \qquad \rho_j = \alpha_j\overset{\circ}{\rho}_j, \qquad \alpha_s + \alpha_f = 1. \tag{5}$$

Считаем, что полость заполнена тем же флюидом, что и окружающая пористая среда. Уравнения движения внутри полости представляют собой уравнения сохранения массы и импульса и уравнение состояния в линейном акустическом приближении. Вязкость флюида при его движении внутри полости не учитывается.

Результаты расчетов

Разработанная методика численного решения двухмерной задачи о распространении возмущений в цилиндрической полости и окружающей ее пористой среде основана на методе Лакса — Вендроффа.

Представленные на иллюстрациях ниже результаты были получены для расчетной области $0 \le r \le 1$ м, $0 \le z \le 4$ м, при этом цилиндрическая полость занимает область $0 \le r \le r_w = 0{,}1$ м. Материал скелета пористой среды — кварц, полость заполнена водой, в порах содержится вода и газовый гидрат. Поры на границе пористой среды и полости открыты. Газовый гидрат частично заполняет поровое пространство при 1 м $\le z \le$ 3 м, эта область пространства соответствует слою 2

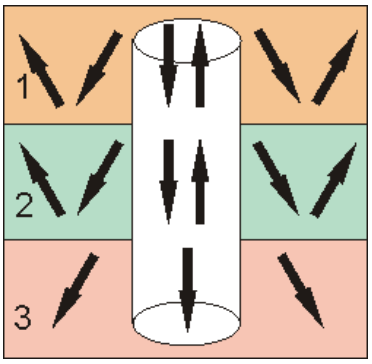


Рис. 2. Схема распространения возмущений. Слой 2 содержит газовый гидрат

Fig. 2. The scheme of the wave propagation; layer 2 contains gas hydrate

на схеме (рис. 2). Возмущение конечной длительности создается источником жидкости, расположенным внутри полости при $0 \le r \le r_w$, $0 \le z \le z_s = 0{,}02$ м.

В отсутствие гидрата пористость составляет 0,4. При этом основные параметры пористой среды следующие: $a_* = 0{,}1$ мм, $\eta_m = 1$, $\eta_\mu = 100$. Модули упругости кварцевого скелета пористой среды $\lambda_{s*} = \mu_{s*} = 8$ ГПа, для гидратной части скелета $\lambda_{h*} = \mu_{h*} = 2$ ГПа. В представленных здесь расчетах в промежуточном слое 2 газовый гидрат заполняет 0,5 (при этом $\alpha_f = 0{,}2$, $\alpha_s = 0{,}8$) и 0,8 порового объема ($\alpha_f = 0{,}08$, $\alpha_s = 0{,}92$). Для зоны 2, содержащей газогидрат, вместо λ_{s*}, μ_{s*} используются эффективные модули упругости, которые рассчитываются по формулам

$$\lambda_* = (\alpha_s \lambda_{s^*} + \alpha_h \lambda_{h^*})/(\alpha_s + \alpha_h), \qquad \mu_* = (\alpha_s \mu_{s^*} + \alpha_h \mu_{h^*})/(\alpha_s + \alpha_h). \quad (6)$$

Для этой зоны также используются эффективные средние значения плотности и объемного модуля упругости для материала твердой фазы.

Как известно из линейного анализа процесса распространения малых возмущений в цилиндрической полости в проницаемой среде, при уменьшении частоты колебаний фазовая скорость волн стремится к нулю. С увеличением проницаемости окружающего полость пористого пространства затухание волн в волноводе возрастает. Поэтому скорость и затухание сигнала на участках с различной проницаемостью окружающей пористой среды различаются, и на границах участков, где происходит изменение проницаемости, могут возникать отраженные волны.

На представленных ниже рисунках показано изменение давления жидкости на оси полости при $r = 0$, $z = 0{,}5$; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 м. Содержание газового гидрата в поровом пространстве слоя 1 м $\le z \le$ 3 м составляло $s_h = 0$, 0,5 и 0,8. Исходный импульс давления имеет осциллирующий характер (рис. 3-4, основная частота 1 кГц, рис. 5-6, основная частота 2 кГц).

На первом из рисунков (рис. 3, $s_h = 0$) показано прохождение волны в волноводе при отсутствии слоя. Сравнение с рисунками при $s_h = 0{,}5$ и 0,8 показывает, что при прохождении участка полости с гидратом в окружающей пористой среде ($z = 1$; 1,5; 2; 2,5; 3 м) амплитуда сигнала несколько увеличивается, т. к. этот участок характеризуется большей скоростью распространения и большей акустической жесткостью. После прохождения этого участка ($z = 3{,}5$ м) амплитуды сигнала почти не отличаются.

Сравнение максимальных значений давления на рис. 4, $z = 1$ м, при различных s_h при прохождении сигнала в участок, содержащий гидрат, позволяет оценить коэффициент отражения от границы. Волну при $s_h = 0$ можно рассматривать как исходную, а при $s_h = 0{,}5$ и 0,8 — как сумму исходной и отраженной от границы. Тогда получаем следующие значения для коэффициентов отражения:

$R = 0{,}06$ при $f = 1$ кГц, $s_h = 0{,}5$,

$R = 0{,}12$ при $f = 1$ кГц, $s_h = 0{,}8$.

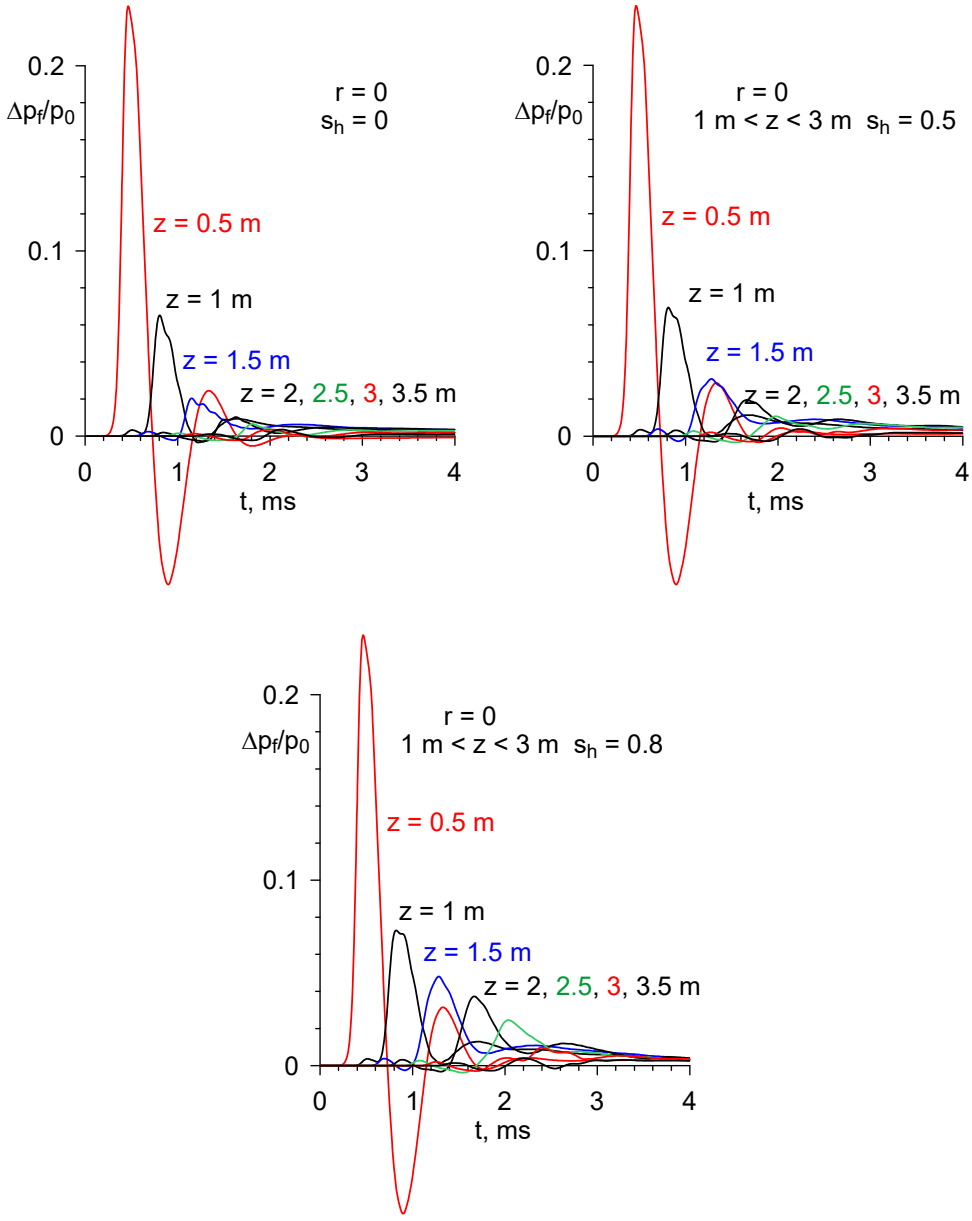


Рис. 3. Изменение давления в жидкости при распространении волны вдоль цилиндрической полости в пористой среде при различных значениях гидратонасыщенности пористого слоя (s_h = 0, 0,5 и 0,8).
Исходный сигнал имеет основную частоту 1 кГц

Fig. 3. The variation of the pressure in the liquid during wave propagation along a cylindrical cavity in a porous medium at different values of hydrate saturation of the porous layer (s_h = 0, 0.5 and 0.8);
the basic frequency of the initial pressure perturbation is 1 kHz

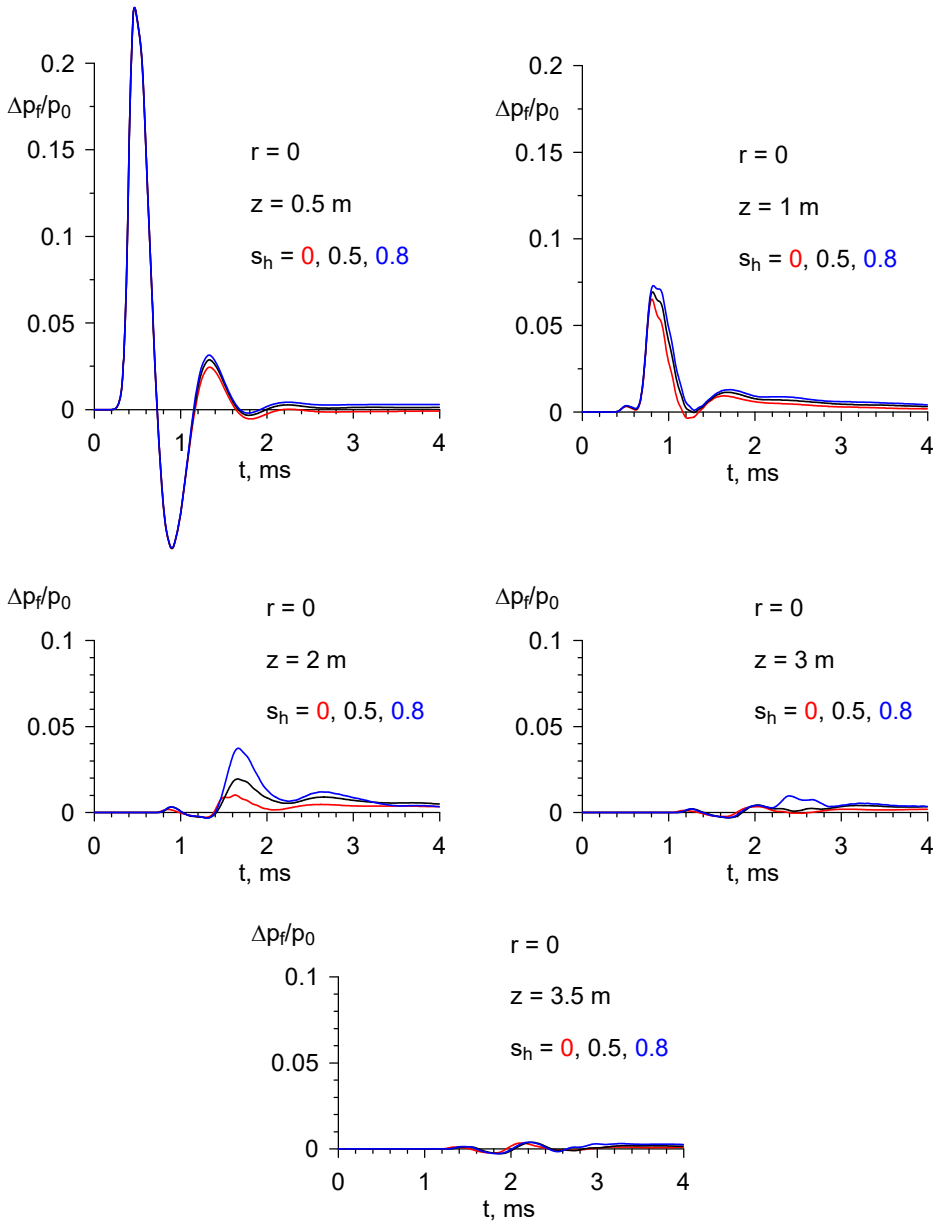
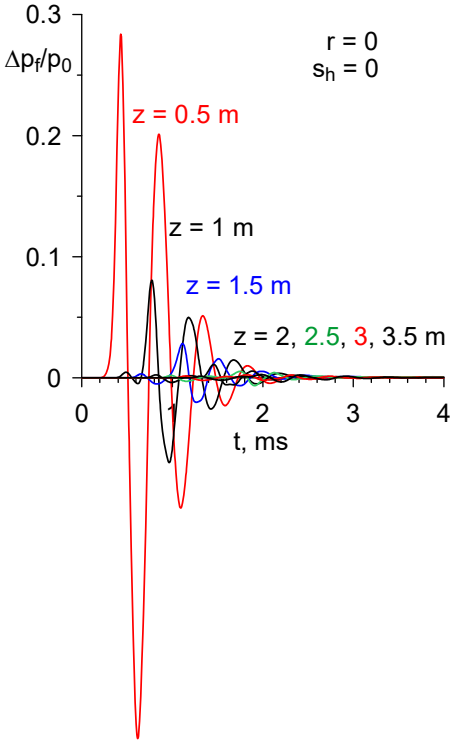
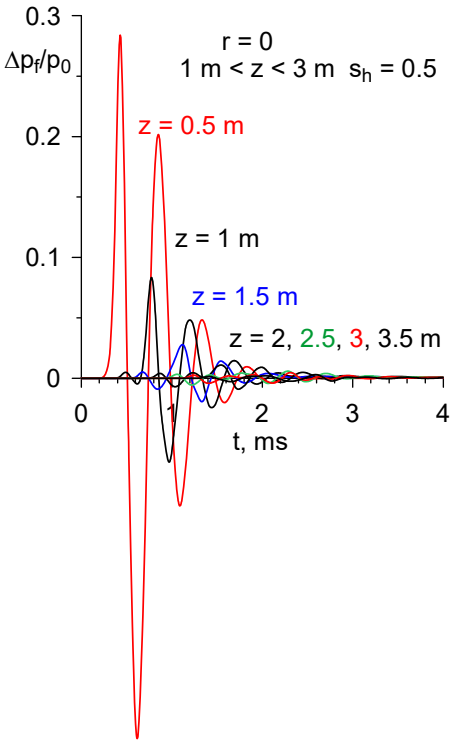


Рис. 4. Влияние гидратонасыщенности пористого слоя на изменение давления в жидкости до, внутри и после гидратонасыщенного слоя при распространении волны вдоль цилиндрической полости в пористой среде. Исходный сигнал имеет основную частоту 1 кГц

Fig. 4. The influence of hydrate saturation on the variation of pressure in the liquid before, inside and after the hydrate-saturated layer during wave propagation along a cylindrical cavity in a porous medium;
the basic frequency of the initial pressure perturbation is 1 kHz





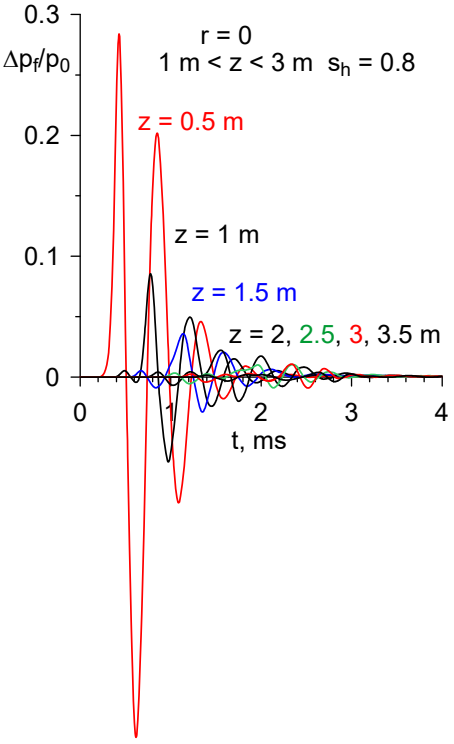


Рис. 5. Изменение давления в жидкости при распространении волны вдоль цилиндрической полости в пористой среде при различных значениях гидратонасыщенности пористого слоя (s_h = 0, 0,5 и 0,8).
Исходный сигнал имеет основную частоту 2 кГц

Fig. 5. The variation of the pressure in the liquid during wave propagation along a cylindrical cavity in a porous medium at different values of hydrate saturation of the porous layer (s_h = 0, 0.5 and 0.8);
the basic frequency of the initial pressure perturbation is 2 kHz

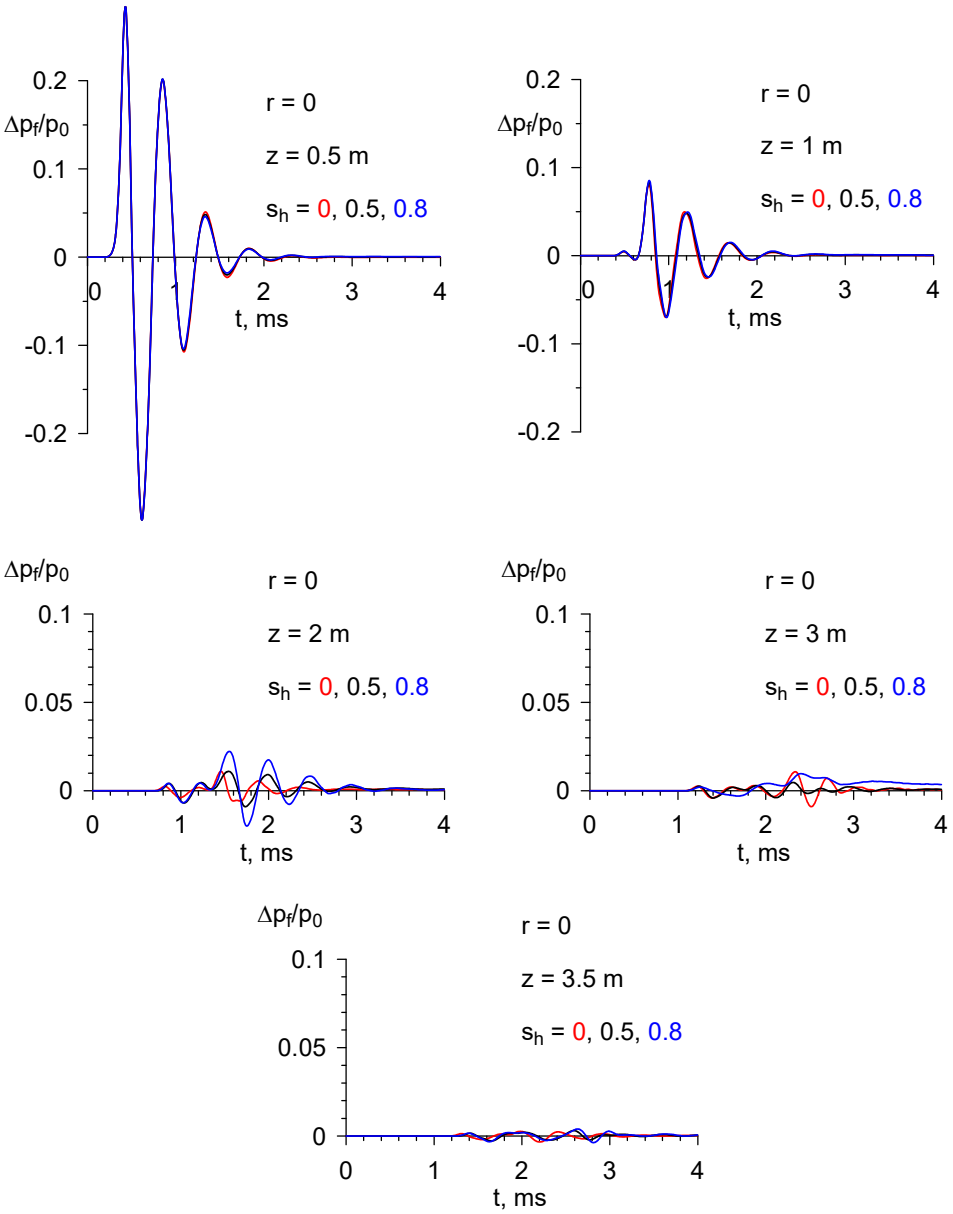


Рис. 6. Влияние гидратонасыщенности пористого слоя на изменение давления в жидкости до, внутри и после гидратонасыщенного слоя при распространении волны вдоль цилиндрической полости в пористой среде. Исходный сигнал имеет основную частоту 2 кГц

Fig. 6. The influence of hydrate saturation on the variation of pressure in the liquid before, inside and after the hydrate-saturated layer during wave propagation along a cylindrical cavity in a porous medium;
the basic frequency of the initial pressure perturbation is 2 kHz

Это согласуется со значениями коэффициентов отражения, рассчитанными для линейных гармонических волн в низкочастотном пределе для волновода в пористой среде с такими же характеристиками [1, 6].

Для импульса с основной частотой 2 кГц (рис. 5-6) наблюдается существенное затухание сигнала, его форма при этом меняется незначительно. Видно некоторое увеличение амплитуды сигнала при его вхождении в участок, содержащий гидрат в окружающем пространстве, но оно не столь существенное, как в предыдущем случае. Аналогичные оценки для коэффициентов отражения, полученные по максимальным значениям давления при $z = 1$ м, дают значения:

$$R = 0{,}025 \quad \text{при } f = 2 \text{ кГц}, \ s_h = 0{,}5,$$

$$R = 0{,}05 \quad \text{при } f = 2 \text{ кГц}, \ s_h = 0{,}8.$$

Эти значения также хорошо согласуются со значениями коэффициентов отражения указанных частот, рассчитанными в рамках линейной теории [1, 6].

Проведенные расчеты показали, что отражение от второй границы влияет на суммарный коэффициент отражения от слоя лишь при малой его толщине, меньшей, чем характерная длина волны исходного сигнала.

Заключение

Проведено численное исследование распространения волн давления в цилиндрической полости в пористой среде с гидратосодержащим слоем. Получены оценки для коэффициентов отражения волн на границах гидратосодержащего слоя внутри полости. Изучено влияние частоты сигнала, толщины, степени гидратонасыщенности слоя на эволюцию волны давления внутри полости. Полученные результаты согласуются с результатами решения данной задачи в линейном приближении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губайдуллин А. А. Распространение линейных волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем / А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева, Д. Н. Дудко // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Том 12. № 1. С. 9-14.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
3. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1978. 336 с.
4. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований / Н. Н. Пузырев. Новосибирск: Изд-во СО РАН: НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
5. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Дж. Э. Уайт. М.: Недра, 1986. 261 с.
6. Gubaidullin A. A. Waves in Porous Media Containing Gas Hydrate / A. A. Gubaidullin, O. Yu. Boldyreva, D. N. Dudko // AIP Conference Proceedings 1939, 020031 (2018). DOI: 10.1063/1.5027343

Olga Yu. BOLDYREVA[1]
Amir A. GUBAIDULLIN[2]
Dina N. DUDKO[3]

UDC 532.546:534.1

NUMERICAL STUDY OF WAVE PROPAGATION IN A CYLINDRICAL WAVEGUIDE IN A POROUS MEDIUM WITH A HYDRATE-CONTAINING LAYER

[1] Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Tyumen Branch
of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
timms@ikz.ru

[2] Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Mechanics of Multiphase Systems,
University of Tyumen; Director, Tyumen Branch
of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
a.a.gubaidullin@yandex.ru

[3] Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Tyumen Branch
of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
timms@ikz.ru

Abstract

This article studies the features of pressure wave propagation in a cylindrical cavity in a porous medium with a hydrate-containing layer. The study was carried out in the framework of a two-velocity two-stress model of a porous medium. The authors have developed a method of numerical solution of the two-dimensional problem of propagation of perturbations in a cylindrical cavity and surrounding porous medium based on the Lax-Wendroff method.

Citation: Boldyreva O. Yu., Gubaidullin A. A., Dudko D. N. 2018. “Numerical Study of Wave Propagation in a Cylindrical Waveguide in a Porous Medium with a Hydrate-Containing Layer”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 4, pp. 210-221.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-210-221

© University of Tyumen

The obtained calculated data allow estimating the coefficients of reflection and passage of waves through the boundaries of the hydrate-containing layer inside the cavity. The influence of the signal frequency and the length of the hydrate-containing layer on the evolution of the pressure wave inside the cavity is studied. The results of the numerical study are consistent with the previously obtained results of solving this problem in a linear approximation.

The obtained results can be used in the interpretation of well data to clarify the position of the boundaries of the layers crossed by the well, in particular, the hydrate-containing layer.

Keywords

Porous medium, waves, gas hydrate, cylindrical waveguide, reflection coefficient, layer, boundary.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-210-221

REFERENCES

1. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., and Dudko D. N. 2017. “Rasprostranenie lineinykh voln v tsilindricheskom volnovode v poristoi srede c gidratosoderzhashchim sloem” [Linear Wave Propagation in a Cylindrical Waveguide in a Porous Medium with Hydrate Layer]. Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Investigation Center, RAS, vol. 12, no 1, pp. 9-14.
2. Nigmatulin R. I. 1990. Dynamics of Multiphase Media. Part 1. New York: Hemisphere Publishing.
3. Nigmatulin R. I. 1978. Osnovy mehaniki geterogennyh sred [Fundamentals of Mechanics of Heterogeneous Media]. Moscow: Nauka.
4. Pusyrev N. N. 1997. Metody i ob’ekty seismicheskih issledovanii [Methods and Objects of Seismic Research]. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS.
5. White J. E. 1983. Underground Sound. Application of Seismic Waves. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier.
6. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., and Dudko D. N. 2018. “Waves in Porous Media Containing Gas Hydrate”. AIP Conference Proceedings, vol. 1939, 020031. DOI: 10.1063/1.5027343