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

УДК 532.546:534.1

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ В НАСЫЩЕННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ*

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

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

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

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-51-540001).

Цитирование: Губайдуллин А. А. Распространение импульсных возмущений в цилиндрическом волноводе в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде / А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева, Д. Н. Дудко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 1. С. 111-122.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-111-122

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Аннотация

Проведено численное исследование особенностей распространения волн давления в заполненной жидкостью цилиндрической полости в пористой среде, содержащей пузырьковую жидкость, 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 с пузырьковой жидкостью.

Результаты расчетов позволяют оценить влияние пузырьков газа в пористой среде на распространение и затухание сигнала в цилиндрическом волноводе. Проанализировано влияние газосодержания, частоты исходного сигнала на эволюцию волны давления внутри полости и в окружающей пористой среде. Проведены расчеты кривых скорости и затухания волн для набора частот в цилиндрическом волноводе. Установлено, что наличие пузырьков приводит к усилению затухания сигнала как внутри полости, так и в пористой среде.

Результаты работы могут быть использованы при интерпретации данных геофизических исследований скважин.

Ключевые слова

Пористая среда, пузырьковая жидкость, волны, импульс, затухание, цилиндрическая полость.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-111-122

Введение

Пористость, проницаемость, водо- или нефтенасыщенность горных пород в геофизике определяются, в частности, с помощью акустических волн в скважинах [7, 8]. Такие волны обычно называют трубными волнами, или волнами Стоунли. Чтобы корректно определить акустические свойства, необходимо ясное понимание влияния характеристик пласта на распространение и затухание волн в скважине. Распространение волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде, частично заполненной газовым гидратом, исследовалось в [1, 2, 10].

В пластовых жидкостях во многих случаях присутствует газ. Например, газ образуется при кислотных обработках низкопроницаемых зон. Поэтому представляется актуальным учитывать присутствие пузырьков газа при изучении волновых процессов в пористых средах. В работах [3, 12-14] приведены результаты экспериментов по распространению волн в пористых средах, которые насыщены жидкостью с пузырьками газа. Численные исследования волновых процессов в частично насыщенных пористых средах проводились в [4, 9, 11].

Уравнения движения

В работе рассматривается задача об эволюции возмущений давления в цилиндрическом волноводе, который заполнен жидкостью и окружен пористой средой.

Пористая среда насыщена жидкостью с пузырьками газа. Используется двухскоростная модель пористой среды. В этом случае уравнения движения пористой среды и содержащейся в порах пузырьковой жидкости имеют вид [5]:

$$\frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \nabla^i\left(\rho_{l+g} v_l^i\right) = 0\,, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^i\left(\rho_s v_s^i\right) = 0\,, \quad \frac{\partial n_b}{\partial t} + \nabla^i\left(n_b v_l^i\right) = 0\,,$$

$$\rho_{l+g}\frac{d_l v_l^i}{dt} = -\alpha_{l+g}\nabla^i p_l - F^i\,, \tag{1}$$

$$\rho_s\frac{d_s v_s^i}{dt} = -\alpha_s\nabla^i p_l + \nabla^j\sigma_{s*}^{ji} + F^i\,,$$

$$F = F_m + F_\mu\,, \quad F_m = \frac{1}{2}\eta_m\alpha_s\rho_{l+g}\left(\frac{d_l v_l}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt}\right), \tag{2}$$

$$F_\mu = \eta_\mu\alpha_s\alpha_{l+g}\mu_l a_{s*}^{-2}\left(v_l - v_s\right),$$

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

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

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

$$\frac{p_g}{p_{g0}} = \left(\frac{\overset{\circ}{\rho}_g}{\overset{\circ}{\rho}_{g0}}\right)^\gamma = \left(\frac{a_{b0}}{a_b}\right)^{3\gamma}. \tag{5}$$

$$\rho_s = \alpha_s\overset{\circ}{\rho}_s\,, \quad \rho_{l+g} = \alpha_l\overset{\circ}{\rho}_l + \alpha_g\overset{\circ}{\rho}_g\,, \quad \alpha_s + \alpha_l + \alpha_g = 1\,, \quad \alpha_g = \frac{4}{3}\pi a_b^3 n_b\,,$$

$$p_{s*} = \alpha_s\left(p_s - p_l\right),\ p_{s*} = -\frac{1}{3}\sigma_{s*}^{mm}. \tag{6}$$

Здесь нижний индекс $j = s, l, l + g$ относится к параметрам скелета пористой среды, жидкости и пузырьковой жидкости. Остальные обозначения соответствуют обозначениям в монографии [5].

Динамика пузырька в пористой среде описывается следующим уравнением [3]:

$$\frac{da_b}{dt} = w_R + w_A\,, \quad w_A = \frac{p_g - p_l - \dfrac{2\Sigma}{a_b}}{\overset{\circ}{\rho}_{l0}C_l s_g^{1/3}}\,, \tag{7}$$

$$\overset{\circ}{\rho}_{l0}\left(\dot{w}_R a_b + \frac{3}{2} w_R^2\right) = p_g - p_l - \frac{2\Sigma}{a_b} - 4\mu_l \frac{w_R}{a_b}\left(1 + \frac{1}{4}\alpha_s \eta_\mu \left(\frac{a_b}{a_{s*}}\right)^2\right).$$

Здесь α_b— радиус пузырька; s_g — объемная доля газа в пузырьковой жидкости; Σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе жидкости и газа; w_A — слагаемое, которое позволяет учесть сжимаемость жидкости [6].

Уравнения движения жидкости внутри полости являются уравнениями баланса массы, импульса и 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 с пузырьками газа основана на методе Лакса — Вендроффа.

Представленные на иллюстрациях ниже результаты были получены для расчетной области $0 \le z \le 2$ м, $0 \le r \le r_w + 1$ м, при этом цилиндрическая полость занимает область $r \le r_w = 0{,}1$ м. Возмущение конечной длительности создается источником жидкости, расположенным внутри полости при $0 \le r \le r_s = 0{,}1$ м, $0 \le z \le z_s = 0{,}1$ м. Материал скелета пористой среды — кварц, жидкость — вода, газ — метан. Рассмотрен случай открытых пор на границе пористой среды и полости.

Приняты следующие начальные значения основных параметров: пористость 0,4, характерный размер зерен пористой среды $a_{s*} = 0{,}1$ мм, объемные содержания фаз $\alpha_s = 0{,}6$, $\alpha_l = 0{,}396$, $\alpha_g = 0{,}004$, $s_g = 0{,}01$, радиус $a_b = 1$ мм; безразмерные коэффициенты в межфазных силах $\eta_m = 1$, $\eta_\mu = 100$, модули упругости скелета пористой среды $\lambda_{s*} = \mu_{s*} = 8$ ГПа. Начальные равновесные значения давления, температуры в системе $p_0 = 5{,}5$ МПа, $T_0 = 280$ К (при этом $\rho_g{}^\circ = 37{,}9$ кг/м^3).

На представленных ниже рисунках показано изменение давления жидкости на оси полости при $r = 0$, $z = 0{,}2$, 0,4, 0,6, 0,8, 1 м (слева), а также в пористой среде при $z = 0{,}2$ м, $r = 0{,}2$, 0,4, 0,6, 0,8, 1 м (справа). На рисунках для сравнения также приведены результаты расчетов для случая отсутствия газа в порах ($s_g = 0$, красные линии) и для случая распространения импульса давления в безграничной жидкости, без пористой среды и газовых пузырьков (синие линии). Исходный импульс давления имеет фазу сжатия и фазу разрежения, общая длительность импульса равна 1 мс (рис. 1) и 0,2 мс (рис. 2).

В безграничной жидкости импульс распространяется практически без искажения, наблюдается лишь радиальное уменьшение амплитуды. При распространении сигнала в волноводе и проникновении возмущения в окружающую пористую среду исходный импульс заметно искажается. При наличии пузырьков газа в пористой среде скорость сигнала снижается, а затухание усиливается. Для импульса с характерной частотой 1 кГц (рис. 1) отмечается более существенное расплывание импульса, чем для более высокочастотного импульса

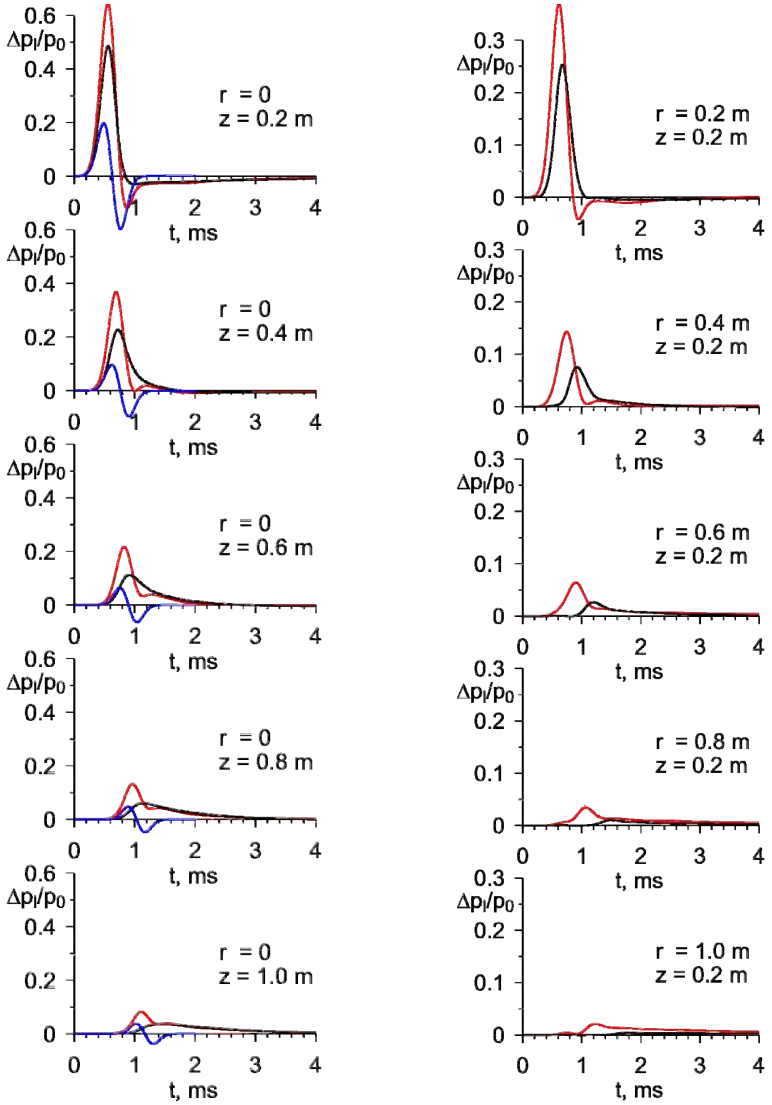

Рис. 1. Изменение давления в жидкости при распространении волны вдоль цилиндрической полости (слева) и в окружающей пористой среде (справа)

Примечание: красные и черные линии соответствуют значениям газосодержания в поровом пространстве $s_g = 0$; 0,01. Синие линии соответствуют распространению сигнала в безграничной жидкости. Исходный импульс имеет длительность 1 мс и характерную частоту 1 кГц.

Fig. 1. The pressure variation in the liquid during wave propagation along the cylindrical cavity (left) and in the surrounding porous medium (right)

Note: red and black lines are the values of gas content in the pore space $s_g = 0$, 0.01. The blue lines are the signal propagation in an unbounded liquid. The initial pulse lasts 1 ms at the characteristic frequency of 1 kHz.

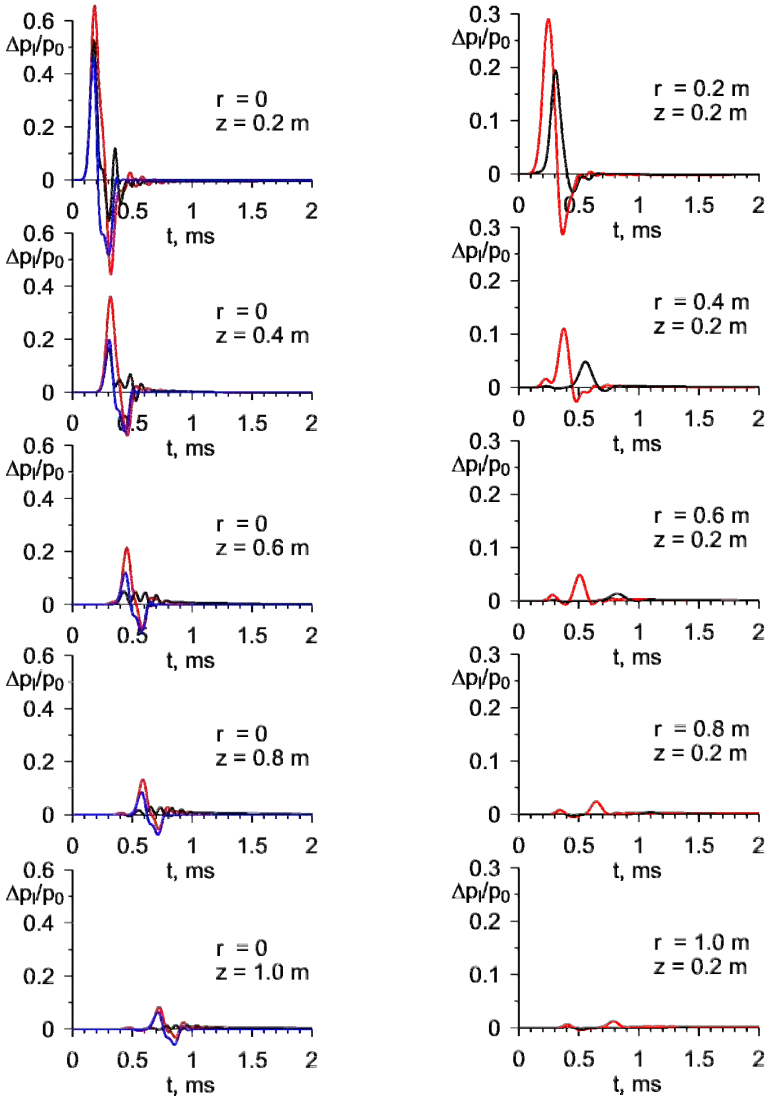

Рис. 2. Изменение давления в жидкости при распространении волны вдоль цилиндрической полости (слева) и в окружающей пористой среде (справа)

Примечание: красные и черные линии соответствуют значениям газосодержания в поровом пространстве $s_g = 0$; 0,01. Синие линии соответствуют распространению сигнала в безграничной жидкости. Исходный импульс имеет длительность 0,2 мс и характерную частоту 5 кГц.

Fig. 2. The pressure variation in the liquid during wave propagation along the cylindrical cavity (left) and in the surrounding porous medium (right)

Note: red and black lines are the values of gas content in the pore space $s_g = 0$, 0.01. The blue lines are the signal propagation in an unbounded liquid. The initial pulse lasts 0.2 ms at the characteristic frequency of 5 kHz.

(рис. 2, характерная частота 5 кГц). По мере удаления от границы в пористой среде давление в жидкости снижается значительнее, чем в полости. Пульсаций пузырьков, соответствующих собственным колебаниям, не наблюдается. В этих случаях давление в жидкости изменяется достаточно плавно, без резких перепадов, поэтому пульсаций пузырьков не возникает. Расчеты показывают, что колебания пузырьков в пористой среде могут наблюдаться вблизи границы с полостью в случаях, когда в исходном сигнале есть резкое повышение давления.

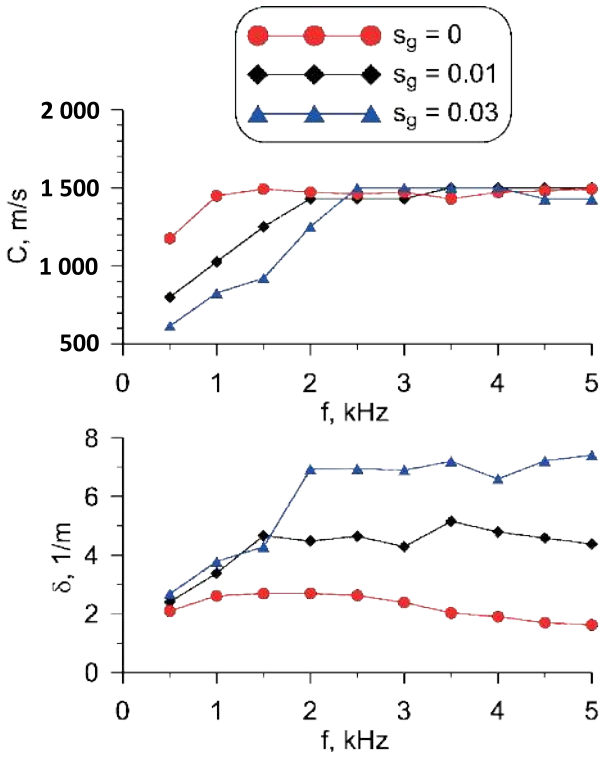

Рис. 3. Зависимости от частоты фазовой скорости *C* и линейного декремента затухания *δ* при распространении волны вдоль заполненной водой цилиндрической полости в пористой среде, насыщенной водой с пузырьками метана

Примечание: красные линии соответствуют отсутствию газа в пористой среде (s_g = 0; α_s = 0,6; α_l = 0,4; α_g = 0), черные линии соответствуют значениям газосодержания в поровом пространстве s_g = 0,01 (α_s = 0,6; α_l = 0,396; α_g = 0,004), синие — s_g = 0,03 (α_s = = 0,6; α_l = 0,388; α_g = 0,012).

Fig. 3. Dependences of the phase velocity *C* and linear damping decrement *δ* on the frequency at the wave propagation along the water saturated cylindrical cavity in a porous medium saturated with water and methane bubbles

Note: red lines are the absence of gas in a porous medium (s_g = 0, α_s = 0.6, α_l = 0.4, α_g = = 0), the black lines — the values of gas content in the pore space s_g = 0.01 (α_s = 0.6, α_l = 0.396, α_g = 0.004), blue lines — s_g = 0.03 (α_s = 0.6, α_l = 0.388, α_g = 0.012).

Была проведена серия расчетов по распространению вдоль полости сигналов с различными основными частотами. По результатам этих расчетов были сделаны оценки изменения скорости и затухания сигнала в зависимости от его основной частоты, которые проиллюстрированы на рис. 3.

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. Показанные на рис. 3 скорости распространения волн от частоты подтверждают эту закономерность. Снижение скорости с уменьшением частоты колебаний выражено сильнее для бóльших значений газосодержания в окружающей пористой среде. С увеличением частоты скорость волн приближается к скорости звука в жидкости, заполняющей полость. Затухание возмущений усиливается с повышением частоты колебаний, а также при увеличении газосодержания.

Заключение

Проведено численное исследование особенностей поведения импульсных возмущений. Результаты расчетов позволяют оценить влияние пузырьков газа в пористой среде на распространение и затухание сигнала в цилиндрическом волноводе. Проанализировано влияние газосодержания, частоты исходного сигнала на эволюцию волны давления внутри полости и в окружающей ее среде. Рассчитаны частотные зависимости скорости и затухания волн в цилиндрическом волноводе. Расчетами показано, что присутствие пузырьков усиливает затухание сигнала при его распространении как внутри полости, так и в пористой среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. 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. DOI: 10.21662/uim2017.1.002
3. Донцов В. Е. Волны давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа / В. Е. Донцов, В. В. Кузнецов, В. Е. Накоряков // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1987. № 4. С. 85-92. DOI: 10.1007/BF01051421
4. Дунин С. З. Продольные волны в частично насыщенных пористых средах. Влияние газовых пузырьков / С. З. Дунин, Д. Н. Михайлов, В. Н. Николаевский // Прикладная математика и механика. 2006. Том 70. № 2. С. 282-294. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2006.06.008

5. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Часть 1 / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987. 464 с.
6. Нигматулин Р. И. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде / Р. И. Нигматулин, В. Ш. Шагапов, Н. К. Вахитова // Доклады Академии наук СССР. 1989. Том 304. № 35. С. 1077-1081.
7. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований / Н. Н. Пузырев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
8. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Дж. Э. Уайт. М.: Недра. 1986. 261 с.
9. Gubaidullin A. A. Pressure wave propagation in porous structure saturated with water and methane bubbles / A. A. Gubaidullin, O. Yu. Boldyreva, D. N. Hai, D. N. Dudko, N. G. Musakaev, N. T. Thang, N. Q. Thai // Proceedings of the 1st International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems (Hanoi, Vietnam, 2018). Pp. 574-577.
10. Gubaidullin A. A. Waves in porous media containing gas hydrate / A. A. Gubaidullin, O. Yu. Boldyreva, D. N. Dudko // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1939. No 1. 020031. DOI: 10.1063/1.5027343
11. Gubaidullin A. A. Waves in porous media saturated with bubbly liquid / A. A. Gubaidullin, O. Yu. Boldyreva, D. N. Dudko // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899. No 3. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/899/3/032011
12. Smeulders D. M. J. On Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media / D. M. J. Smeulders. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1992. 131 p. DOI: 10.6100/IR375910
13. Smeulders D. M. J. Wave propagation in porous media containing a dilute gas-liquid mixture: theory and experiments / D. M. J. Smeulders, M. E. H. van Dongen // Journal of Fluid Mechanics. 1997. Vol. 343. Pp. 351-373. DOI: 10.1017/S0022112097005983
14. Van der Grinten J. G. M. An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media / J. G. M. van der Grinten. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1987. 111 p. DOI: 10.6100/IR274910

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

UDC 532.546:534.1

PROPAGATION OF PULSE PERTURBATIONS IN A CYLINDRICAL WAVEGUIDE IN A POROUS MEDIUM SATURATED WITH BUBBLY LIQUID*

[1] Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Mechanics of Multiphase Systems, University of Tyumen;
Director of 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

[2] 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

[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 presents a numerical study of the features of the pressure wave propagation in a cylindrical cavity filled with a liquid in a porous medium saturated with liquids and bubbles. The authors have used a two-velocity and two-stress model of a porous medium. They have developed a numerical solution for a two-dimensional problem of the perturbations

* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No 17-51-540001).

Citation: Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. 2019. "Propagation of pulse perturbations in a cylindrical waveguide in a porous medium saturated with bubbly liquid". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 1, pp. 111-122.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-111-122

© University of Tyumen

propagation in a cylindrical cavity and porous medium with a bubbly liquid, surrounding this cavity.

The effect of gas bubbles in a porous medium on the propagation and attenuation of a signal in a cylindrical waveguide was estimated by calculations. In addition, the calculations allow analyzing the influence of the gas content and the frequency of the initial signal on the evolution of the pressure wave inside the cavity and porous medium. For a number of frequencies, the authors have calculated the wave velocity and attenuation curves. The results show that the presence of bubbles leads to an increase in the attenuation of the signal both inside the cavity and in the porous medium.

This work can help be used in the interpretation of wells logging data.

Keywords

Porous medium, bubbly liquid, waves, pulse, attenuation, cylindrical cavity.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-111-122

REFERENCES

1. 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 [In Russian]
2. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. 2017. “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. DOI: 10.21662/uim2017.1.002 [In Russian]
3. Dontsov V. E., Kuznetsov V. V., Nakoryakov V. E. 1987. “Pressure waves in a porous medium saturates with liquid with gas bubbles”. Izvestia Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza [= Fluid Dynamics], no 4, pp. 85-92. DOI: 10.1007/BF01051421 [In Russian]
4. Dunin S. Z., Mikhailov D. N., Nikolaevskii V. N. 2006. “Longitudinal waves in partially saturated porous media. Effect of gas bubbles”. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol. 70, no 2, pp. 282-294. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2006.06.008 DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2006.06.008 [In Russian]
5. Nigmatulin R. I. 1990. Dynamics of Multiphase Media. Vol. 1. New York: Hemisphere Publishing. [In Russian]
6. Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Vakhitova N. K. 1989. “The effect of the compressibility of the carrier phase during the wave propagation in a bubbly medium”. Doklady Akademii nauk SSSR, vol. 304, no 35, pp. 1077-1081. [In Russian]
7. Pusyrev N. N. 1997. Methods and Objects of Seismic Research. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]

8. White J. E. 1983. Underground Sound. Application of Seismic Waves. Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier. [In Russian]
9. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Hai D. N., Dudko D. N., Musakaev N. G., Thang N. T., Thai N. Q. 2018. "Pressure wave propagation in porous structure saturated with water and methane bubbles". Proceedings of the 1st International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems (Hanoi, Vietnam), pp. 574-577.
10. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. 2018. "Waves in porous media containing gas hydrate". AIP Conference Proceedings, vol. 1939, no 1, 020031. DOI: 10.1063/1.5027343
11. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. 2017. "Waves in porous media saturated with bubbly liquid". Journal of Physics: Conference Series, vol. 899, no 3, 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/899/3/032011
12. Smeulders D. M. J. 1992. On Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. DOI: 10.6100/IR375910
13. Smeulders D. M. J., van Dongen M. E. H. 1997. "Wave propagation in porous media containing a dilute gas-liquid mixture: theory and experiments". Journal of Fluid Mechanics, vol. 343, pp. 351-373. DOI: 10.1017/S0022112097005983
14. Van der Grinten J. G. M. 1987. An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. DOI: 10.6100/IR274910