Вестник Тюменского государственного университета.
Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 1(1). 77-83

© А.А. ГУБАЙДУЛЛИН[1], О.Ю. БОЛДЫРЕВА[2], Д.Н. ДУДКО[3]

[1,2,3]Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал)
[1] Тюменский государственный университет
gubai@tmn.ru, timms@ikz.ru

УДК 532.546:534.1

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ОКРУЖЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВОДОНЕФТЯНУЮ ЭМУЛЬСИЮ

PROPAGATION AND ATTENUATION OF PERTURBABATIONS ALONG THE CYLINDRICAL BORE IN A POROUS MEDIUM SATURATED WITH WATER-OIL EMULSION

Рассматривается задача о распространении акустических волн вдоль цилиндрической полости, окруженной проницаемой пористой средой, содержащей водонефтяную эмульсию. Эмульсия моделируется ньютоновской жидкостью с эффективной вязкостью. В двухмерной осесимметричной постановке численно исследуется распространение и затухание высокочастотного импульса вдоль полости, а также проникновение возмущений в окружающее пористое пространство. Показано, что в случае насыщения пористой среды и полости водонефтяной эмульсией или нефтью затухание импульса в полости может быть сильнее, чем при насыщении водой, и наблюдаются большее затухание и меньшая глубина проникновения возмущений в окружающее пористое пространство.

Propagation of acoustic waves along the cylindrical bore in a permeable porous medium saturated with water-oil emulsion is investigated. Emulsion is modeled with Newtonian liquid characterized by effective viscosity. High-frequency pulse propagation and attenuation along the bore and in the surrounding porous medium are numerically studied in a bi-dimensional, axially symmetrical arrangement. It is shown that there are the greater attenuation along the bore and the smaller depth of penetration of perturbation into the porous medium for the water-oil emulsion or oil than for water in the bore and the porous medium.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Пористая среда, водонефтяная эмульсия, акустические волны.

KEY WORDS. Porous medium, oil-water emulsion, acoustic waves.

Необходимость исследования свойств акустических поверхностных волн связана с многочисленными приложениями, например с задачами определения свойств упругих материалов. В частности, в геофизике поверхностные акустические волны используются для определения характеристик водонасыщенных

© ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет

и углеводородных пластов, когда влиянием насыщающего пористую среду флюида на распространение волн нельзя пренебречь. В традиционных акустических исследованиях скважин по первому вступлению акустического импульса определяется пористость породы, по всему цугу волн определяются ее механические свойства, а одно из последующих вступлений, волна Стоунли (также называемая трубной волной), используется для определения проницаемости. Для правильной интерпретации акустических каротажных диаграмм требуется глубокое понимание влияния свойств пород (пористости, проницаемости, литологического состава, насыщенности углеводородами) на распространение волн в цилиндрическом волноводе, который представляет собой скважина. Актуальной также представляется задача о распространении волн в цилиндрическом волноводе в случае насыщения окружающего пористого пространства нефтью или водонефтяными эмульсиями.

В основном работы по исследованию распространения волн в цилиндрическом волноводе с непроницаемыми или проницаемыми стенками ограничиваются случаем низких частот, когда длина волны превышает диаметр полости [1-10]. В данной работе методами механики многофазных систем [11-13] рассмотрено распространение волн в широком частотном диапазоне вдоль цилиндрической полости, окруженной проницаемой пористой средой, насыщенной водонефтяной эмульсией, нефтью или водой.

Постановка задачи, уравнения движения. Пусть в пористой среде имеется цилиндрическая полость радиуса r_w. Жидкость, заполняющая полость и окружающее пористое пространство, представляет собой водонефтяную эмульсию. Эмульсия моделируется ньютоновской жидкостью с эффективной вязкостью. Рассматривается задача о распространении импульса вдоль полости и о его проникновении в окружающее пористое пространство. Поры на границе полости с пористой средой считаются открытыми. Эффективная вязкость учитывается только в межфазной силе взаимодействия жидкости и скелета пористой среды при фильтрации в окружающее пространство и не учитывается при течении жидкости внутри полости.

Движение жидкости и пористой среды считается двумерным, осесимметричным и рассматривается в цилиндрических координатах (r, θ, z).

Система уравнений движения пористой среды имеет вид [11]:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\rho_s v_s^r\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_s v_s^z\right) = 0,\\
&\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\rho_f v_f^r\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_f v_f^z\right) = J_f,\\
&\rho_s \frac{d_s v_s^r}{\partial t} = -\alpha_s \frac{\partial p_f}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{s*}^{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{s*}^{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{s*}^{rr} - \sigma_{s*}^{\theta\theta}}{r} + F^r,\\
&\rho_s \frac{d_s v_s^z}{\partial t} = -\alpha_s \frac{\partial p_f}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{s*}^{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{s*}^{rz}}{r} + \frac{\partial \sigma_{s*}^{zz}}{\partial z} + F^z,\\
&\rho_f \frac{d_f v_f^r}{\partial t} = -\alpha_f \frac{\partial p_f}{\partial r} - F^r - J_f v_f^r,
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

$$\rho_f \frac{d_f v_f^z}{\partial t} = -\alpha_f \frac{\partial p_f}{\partial z} - F^z - J_f v_f^z,$$

$$\sigma_{s*}^{rr} = \alpha_s \left[(\lambda_* + 2\mu_*)\varepsilon_s^{rr} + \lambda_* \left(\varepsilon_s^{\theta\theta} + \varepsilon_s^{zz} \right) + \nu_* p_f' \right],$$

$$\sigma_{s*}^{zz} = \alpha_s \left[(\lambda_* + 2\mu_*)\varepsilon_s^{zz} + \lambda_* \left(\varepsilon_s^{rr} + \varepsilon_s^{\theta\theta} \right) + \nu_* p_f' \right],$$

$$\sigma_{s*}^{rz} = \alpha_s 2\mu_* \varepsilon_s^{rz}, \qquad \nu_* = \frac{\lambda_* + 2\mu_*/3}{K_s},$$

$$\frac{d_s \varepsilon_s^{rr}}{dt} = \frac{\partial v_s^r}{\partial r}, \qquad \frac{d_s \varepsilon_s^{zz}}{dt} = \frac{\partial v_s^z}{\partial z},$$

$$\frac{d_s \varepsilon_s^{rz}}{dt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_s^r}{\partial z} + \frac{\partial v_s^z}{\partial r} \right), \qquad \frac{d_s \varepsilon_s^{\theta\theta}}{dt} = \frac{v_s^r}{r},$$

$$\rho_s = \alpha_s \rho_s^\circ, \qquad \rho_f = \alpha_f \rho_f^\circ, \qquad \alpha_f + \alpha_s = 1,$$

$$p_s' = K_s \rho_s^{\circ\prime} / \rho_{s0}^\circ, \qquad p_f' = K_f \rho_f^{\circ\prime} / \rho_{f0}^\circ,$$

$$p_{s*}' = \alpha_s (p_s' - p_f'), \qquad p_{s*} = -\alpha_s \left[\left(\lambda_* + \frac{2}{3}\mu_* \right) \left(\varepsilon_s^{rr} + \varepsilon_s^{zz} + \varepsilon_s^{\theta\theta} \right) + \nu_* p_f' \right].$$

Здесь верхние индексы — координатные, нижние индексы $j = s, f$ относятся к параметрам твердой или жидкой фазы соответственно; нижний индекс 0 означает невозмущенное значение величины, а штрих означает отклонение данной величины от ее невозмущенного значения ($w' = w - w_0$); $\alpha_j, \rho_j, \rho_j^\circ, v_j$ — соответственно объемное содержание, приведенная и истинная плотности и скорость j-фазы; p_f — давление в жидкости; σ_{s*} — приведенное напряжение в скелете среды; F — сила межфазного взаимодействия.

Скелет пористой среды предполагается упругим с модулями упругости $\alpha_s \lambda_*$, $\alpha_s \mu_*$; ε_s — деформации твердой фазы; p_s — давление внутри твердой фазы; K_s, K_f — соответственно объемные модули упругости для материала твердой фазы и для жидкости.

Возмущение создается источником жидкости интенсивности J_f, расположенным внутри канала. Выражение для J_f принято в виде:

$$J_f = \rho_f^\circ \frac{\partial \phi}{\partial t} I(r, z),$$

где $\phi(t)$ — объем нагнетаемой жидкости, отнесенный к единице объема среды; $I(r, z)$ — индикаторная функция источника.

Выражение для межфазной силы F принято в виде суммы силы присоединенных масс F_m, вызванной инерционным взаимодействием фаз, и силы вязкого трения F_v [11]:

$$F = F_m + F_v, \qquad F_m = 0.5\eta_m \alpha_f \alpha_s \rho^{\circ}_f \left(\frac{d_f v_f}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right),$$
$$F_v = \eta_v \alpha_f \alpha_s \mu_f a_*^{-2} (v_f - v_s). \qquad (2)$$

Здесь a_* — характерный размер пор или зерен; η_m, η_v — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Результаты расчетов. Двумерное движение пористой среды и жидкости рассчитывалось по схеме Лакса-Вендроффа [14; 15]. Рассчитывалось распространение возмущения от источника, расположенного внутри канала.

Для расчетов были использованы параметры нефти и водонефтяных эмульсий, взятые из экспериментальных данных [16]. Нефть или эмульсия моделировались ньютоновской жидкостью с эффективной вязкостью. Кроме того, использованы дисперсионные зависимости для пористых сред, насыщенных указанными нефтью или эмульсиями, полученные в [17].

Параметры нефти и эмульсий, использованные в расчетах, приведены в табл. 1. Пористая среда — кварцевый песок, пористость — 0.33, характерный размер зерен — 0.1 мм, радиус полости — 0.1 м.

Таблица 1

Параметры нефти и эмульсий

Вид нефти	s	ρ^{o}_f, кг/м³	μ_f, мПа·с	K_f, ГПа
Тобойское месторождение, скважина 11, T=20°C	0	837	16	1.2
	0.1	854	24	1.26
	0.3	886	28.5	1.39
	0.5	919	90	1.56

Исследовано распространение и затухание высокочастотного импульса вдоль полости, а также проникновение возмущений в окружающее пористое пространство. В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны изменение давления в нескольких точках на границе полости, а также изменение давления вдоль радиальной координаты для нескольких моментов времени. Проведено сравнение скорости распространения, затухания волн в канале, а также глубины проникновения возмущений в окружающую пористую среду со случаями насыщения полости и пористого пространства водой или нефтью.

Возмущения в среде создавались источником жидкости внутри канала, занимающим область в виде диска ($r \le r_w, z = 0$).

Из рис. 1 видно, что в случае насыщения пористой среды и полости эмульсией или нефтью (б-г) скорость распространения волн вдоль полости ниже, чем при насыщении водой (а). При удалении от полости возмущения убывают быстрее в насыщенной эмульсией или нефтью пористой среде.

Таким образом, в случае насыщения пористой среды и полости водонефтяной эмульсией или нефтью затухание импульса в полости может быть сильнее, чем при насыщении водой, и наблюдаются большее затухание и меньшая глубина проникновения возмущений в окружающее пористое пространство.

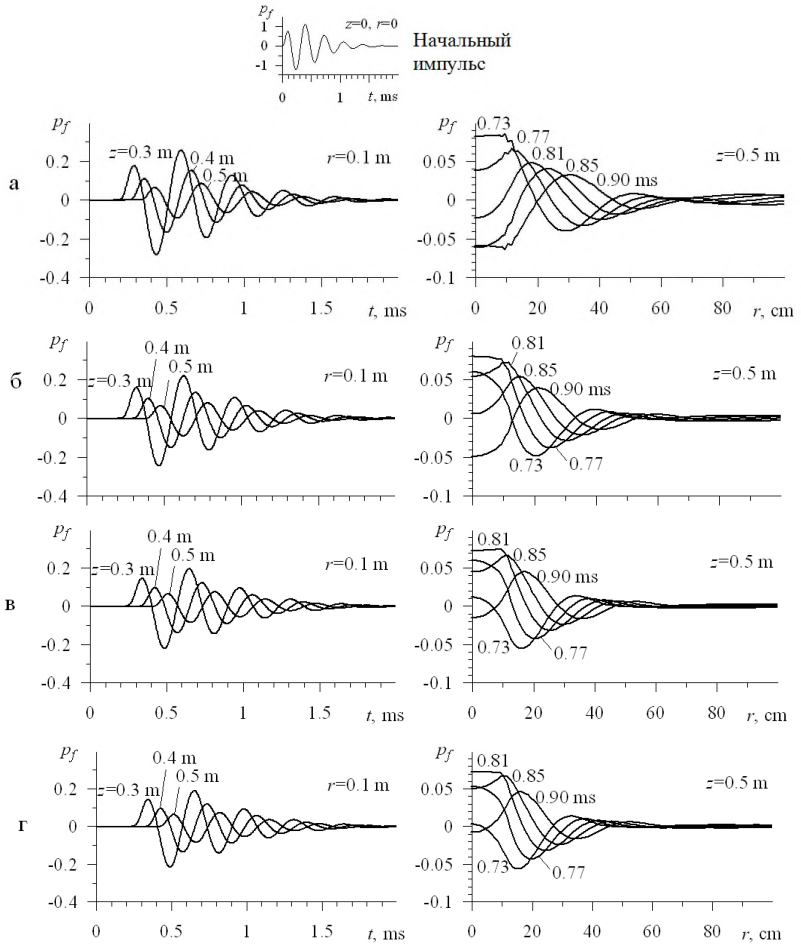

Рис. 1. Изменение давления в жидкости на границе полости (r = 0.1 м) при z = 0.3, 0.4, 0.5 м, а также распределение давления внутри полости и в окружающем пористом пространстве при z = 0.5 м для нескольких моментов времени. Полость и окружающая пористая среда насыщена водой (а), эмульсией с водосодержанием 0.5 (б), 0.1 (в), нефтью (г). Начальный импульс основной частоты 3 кГц показан вверху

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. 261 с.

2. Chao, G., Smeulders, D.M.J., Dongen, M.E.H. van. Shock-induced borehole waves in porous formations: Theorety and experiments // J. Acoust. Soc. Am. 2004. Vol. 116(2). Pp. 693-702.

3. Hassan, W., Nagy, P. On the low-frequency oscillation of a fluid layer between two elastic plates // J. Acoust. Soc. Am. 1997. Vol. 102(6). Pp. 3343-3348.

4. Hsu, C.J., Kostek, S., Johnson, D.L. Tube waves and mandrel modes: Experiment and theory // J. Acoust. Soc. Am. 1997. Vol. 102(6). Pp. 3277-3289.

5. Liu, H.-L. Borehole modes in a cylindrical fluid-saturated permeable medium // J. Acoust. Soc. Am. 1988. Vol. 84(1). Pp. 424-431.

6. Norris, A.N. Stoneley-wave attenuation and dispersion in permeable formations // Geophysics. 1989. Vol. 54. № 3. Pp. 330-341.

7. Norris, A.N. The speed of a tube wave // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 87(1). Pp. 414-417.

8. Paillet, F.L., White, J.E. Acoustic modes of propagation in the borehole and their relationship to rock properties // Geophysics. 1982. Vol. 47. № 8. Pp. 1215-1228.

9. Tang, X.M., Cheng, C.H., Toksöz, M.N. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90(3). Pp. 1632-1646.

10. Winkler, K.W., Liu, H.-L., Johnson, D.L. Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiment and theory // Geophysics. 1989. Vol. 54. № 1. Pp. 66-75.

11. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

12. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю. Распространение волн вдоль границы насыщенной пористой среды и жидкости // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 2. С. 201-211.

13. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю. Волны на поверхности раздела насыщенной пористой среды и жидкости // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409, № 3.

14. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.

15. Gubaidullin, A.A., Dudko, D.N. Modelling of the Impact of Air Shock Wave on Obstacle Covered by Porous Screen // Computational Mechanics. 2003. Vol. 31. № 6. Pp. 453-460.

16. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование влияния анакларида «рагена» на нефтеотдачу» (ООО «Реагент»). Тюмень, 2006.

17. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Волны в пористых средах, насыщенных водонефтяной эмульсией // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии: сб. науч. статей. Вып. 2(10). Киев: НПВК Триакон, 2012. С. 96-100.

REFERENCES

1. White, J.E. Underground Sound: Application of Seismic Waves. Moscow: Nedra. 1986. 261 p. (in Russian).

2. Chao, G., Smeulders, D.M.J., Dongen, M.E.H., van. Shock-induced borehole waves in porous formations: Theory and experiments // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 116(2). 2004. Pp. 693-702.

3. Hassan, W., Nagy, P. On the low-frequency oscillation of a fluid layer between two elastic plates // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 102(6).1997. Pp. 3343-3348.

4. Hsu, C.J., Kostek, S., Johnson, D.L. Tube waves and mandrel modes: Experiment and theory // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 102(6). 1997. Pp. 3277-3289.

5. Liu, H.-L. Borehole modes in a cylindrical fluid-saturated permeable medium // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 84(1). 1988. Pp. 424-431.

6. Norris, A.N. Stoneley-wave attenuation and dispersion in permeable formations // Geophysics. Vol. 54. № 3. 1989. Pp. 330-341.

7. Norris, A.N. The speed of a tube wave // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 87(1). 1990. Pp. 414-417.

8. Paillet, F.L., White, J.E. Acoustic modes of propagation in the borehole and their relationship to rock properties // Geophysics. Vol. 47. № 8. 1982. Pp. 1215-1228.

9. Tang, X.M., Cheng, C.H., Toksцz, M.N. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model // The Journal of the Acoustics Society of America. Vol. 90(3). 1991. Pp. 1632-1646.

10. Winkler, K.W., Liu, H.-L., Johnson, D.L. Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiment and theory // Geophysics. Vol. 54. № 1. 1989. Pp. 66-75.

11. Nigmatulin, R.I. Dynamics of multiphase media. Part 1. Moscow: Nauka, 1987. 464 p. (in Russian).

12. Gubaidullin, A.A., Boldyreva, O.Yu. Wave propagation along the boundary between a saturated porous medium and a liquid // Acoustics Journal. Vol. 52. № 2. 2006. Pp. 163-172. (in Russian).

13. Gubaidullin, A.A., Boldyreva, O.Yu. Waves on the surface between a saturated porous medium and a fluid // Papers of the Academy of Sciences. Vol. 409. № 3. 2006. Pp. 379-382. (in Russian).

14. Richtmyer, R.D., Morton, K.W. Difference methods for initial-value problems. Moscow: Mir. 1972. (in Russian).

15. Gubaidullin, A.A., Dudko, D.N. Modelling of the impact of air shock wave on obstacle covered by porous screen // Computational Mechanics. Vol. 31. № 6. 2003. Pp. 453-460.

16. The study of effect of "ragen" anaklarid on oil recovery. Report on research work. Contract of OOO Reagent. Tyumen. 2006. (in Russian).

17. Gubaidullin, A.A., Boldyreva, O.Yu., Dudko, D.N. Waves in porous media saturated with water-oil emulsion // Modern Science: Research, Ideas, Results and Technologies. № 2(10). Kiev: NPVK Triakon. 2012. Pp. 96-100. (in Russian).

Авторы публикации

Губайдуллин Амир Анварович — директор Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, профессор кафедры механики многофазных систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Болдырева Ольга Юрьевна — старший научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, кандидат физико-математических наук

Дудко Дина Николаевна — научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, кандидат физико-математических наук

Authors of the publication

Amir A. Gubaidullin — Dr. Phys. and Math. Sci., Professor, Department of Mechanics of Multiphase Systems, Tyumen State University, Director of Tyumen Branch of The Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences

Olga Yu. Boldyreva — Cand. Phys. and Math. Sci., Senior Research Associate, Tyumen Branch of The Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences

Dina N. Dudko — Cand. Phys. and Math. Sci., Research Associate, Tyumen Branch of The Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences