

2. Cottin-Bizonne C., Barentin C., Charlaix E., Bocquet L., and Barrat J.-L. Dynamics of simple liquids at heterogeneous surface: Molecular dynamics simulations and hydrodynamic description // *Eur. Phys. J. E.* — 2004. — V. 15. — P. 427.
3. Chiu-On Ng and C. Y. Wang. Stokes shear flow over a grating: Implications for superhydrophobic slip // *Physics of Fluids.* — 2009. — V. 21. — P. 013602-1.
4. Asmolov E. S., Dubov A. L., Nizkaya T. V., Kuehne A. J. C., Vinogradova O. I. Principles of transverse flow fractionation of microparticles in superhydrophobic channels // *Lab Chip.* — 2015. — V. 15.
5. Markov A. A. Jump-Slip simulation technique for combustion in submicron tubes and submicron pores // *Computers and Fluids.* — 2014. — V. 99C. — P. 83–92.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В УСЛОВИЯХ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ*

Е. А. Марфин¹, А. Г. Гаврилов²

¹ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия; ²Институт физики КФУ, Казань, Россия

Акустическое воздействие на продуктивный пласт представляет собой перспективное направление повышения эффективности разработки нефтяных месторождений [1]. При таком воздействии происходит повышение темпа добычи, снижение обводненности нефти и увеличению коэффициента извлечения нефти [1–3]. Основным механизмом такого эффекта является изменение под действием упругих колебаний фильтрационных свойств продуктивного пласта [3–5]. Настоящая работа посвящена оценке перспектив использования методов нестационарной фильтрации для анализа эффективности акустического воздействия на пласт.

Теория фильтрации основана на экспериментах Дарси со стационарными течениями жидкости в пористых средах. Позднее возникла потребность в исследовании скважин на неустановившихся режимах и управлении фильтрационными потоками [6]. Были разработаны нестационарные методы исследований скважин. Дальнейшее развитие моделей фильтрации происходило в направлении учета явлений запаздывания, нелинейных явлений, деформаций, свойств неньютоновских жидкостей, тепловых явлений [7–9]. Наиболее распространенными нестационарными методами являются метод кривых восстановления давления и метод фильтрационных волн давления [10].

В настоящей работе рассматривается плоскопараллельная фильтрация. В условиях акустического воздействия на пористую среду ее свойства будут зависеть от параметров поля упругих колебаний. Обозначим отношение проницаемости пористой среды к вязкости при акустическом воздействии функцией $F(x) = k(x)/\mu(x)$. В этом случае дифференциальное уравнение фильтрации запишется в виде:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + F(x) \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{m}{K_{\text{жп}}} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1)$$

где m — пористость, $K_{\text{жп}}$ — модуль объемного сжатия жидкости с учетом деформации пористой среды.

Рассмотрим модельную насыщенную пористую среду, характеризуемую следующими свойствами: пористость $m = 25\%$, проницаемость $k_0 = 10$ мД, вязкость неф-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан (проект №18-48-160001).

ти $\mu_0 = 0,01$ Па · с, плотность $\rho = 2000$ кг/м³, скорость звука $c = 3000$ м/с, скорость фильтрации $u = 10^{-6}$ м/с, модуль объемного сжатия $K_{жп} = 3 \cdot 10^{11}$ Па. Коэффициент затухания звука пропорционален частоте f по формуле $\alpha = (7 \cdot 10^{-5}) \cdot f$. Акустическое воздействие осуществляется на частоте f и амплитуде колебаний $p_{\omega 0} = 1000$ Па. Для заданных условий с учетом результатов лабораторных экспериментов, опубликованных в работах [4, 5], функция $F(x)$ зависит от частоты колебаний f и от расстояния x в виде:

$$F(x) = \frac{k_0}{\mu_0} \left(\frac{1 + 23,27 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-13,96 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot x}}{0,712 + 9,402 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot x} \right). \quad (2)$$

На рис. 1 показано трехмерное представление этой зависимости в относительном виде. Видно, что на небольших расстояниях от излучателя ($x < 1$ м) относительное значение функции F растет с увеличением частоты. С удалением от излучателя эта зависимость становится отрицательной.

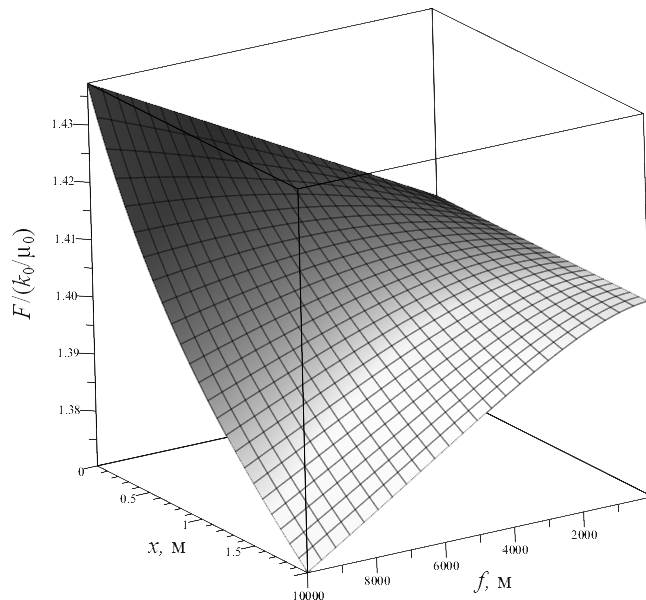


Рис. 1. Зависимость относительного значения функции F от расстояния x и частоты f

Уравнение (1) в виду сложности функции $F(x)$ не имеет аналитического решения по сравнению с отсутствием воздействия, поэтому задача нестационарной фильтрации решалась численно с использованием программы Maple для заданных начальных и граничных условий. Данные численного расчета при реализации метода кривых восстановления давления показывают, что после прекращения фильтрации происходит увеличение давления до начального значения. При этом для случая акустического воздействия это значение меньше, чем без воздействия. С физической точки зрения это означает, что фильтрационные свойства пористой среды после обработки упругими колебаниями улучшаются и для поддержания прежнего значения скорости фильтрации необходим меньший перепад давления. Полученные в работе расчетные данные свидетельствуют о возможности использования метода кривых восстановления давления для оценки эффективности акустического воздействия на пласт.

1. Beresnev I. A., Johnson P. A. Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results // *Geophysics*. — 1994. — V. 59 (6). — P. 1000–1017.
2. Marfin E. A., Kravtsov Y. I., Abdrashitov A. A., Gataullin R. N., Galimzyanova A. R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results // *Petroleum Science and Technology*. — 2015. — V. 33 (15–16). — P. 1526–1532.
3. Manga M., Beresnev I., Brodsky E. E., Elkhoury J. E., Elsworth D., Ingebritsen S. E., Mays D. C., Wang C.-Y. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms // *Reviews of Geophysics*. — 2012. — V. 50 (2). — RG2004.
4. Elkhoury J. E., Niemeijer A., Brodsky E. E., Marone C. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2011. — V. 116. — B02311.
5. Mardegalyamov M. M., Marfin E. A., Vetoshko R. A. Change in permeability of a porous medium at ultrasonic action // *Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences & Time for Breakthrough*. — 2018. — 44532.
6. Muskat M. *Physical Principles of Oil Production*. — 1981. — 922 p.
7. Kuo C. H. Determination of reservoir properties from sinusoidal and multirate flow test in one or more wells // *SPE Journal*. — 1972. — V. 12 (6). — P. 499–507.
8. Gavrilov A., Ovchinnikov M., Kushanova G. Periodic pulse testing in porous media with nonlinear permeability dependence versus pressure // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. — 2018. — V. 13, No. 9. — P. 3236–3239.
9. Трусов А. В., Овчинников М. Н., Марфин Е. А. Особенности распространения и характеристики фильтрационных волн давления при использовании локально-неравновесных моделей // *Георесурсы*. — 2012. — №4 (46). — С. 44–48.
10. Renner J., Messar M. Periodic pumping tests // *Geophysical Journal International*. — 2006. — V. 167 (6). — P. 479–493.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

П. В. Матюшин

ИАП РАН, Москва, Россия

В настоящей работе исследуются пространственные механизмы формирования гравитационных внутренних волн, инициированные движением тела вращения диаметром d и длиной $0,76 \cdot d \leq l \leq 5 \cdot d$ в линейно стратифицированной по плотности несжимаемой вязкой жидкости (в горизонтальном направлении справа налево вдоль своей оси симметрии Z со скоростью U).

Для проведения этого исследования был разработан программный комплекс математического моделирования пространственных отрывных течений линейно стратифицированной по плотности несжимаемой вязкой жидкости около цилиндра. На вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСП РАН) решалась система уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска (1) при помощи численного метода МЕРАНЖ с явной гибридной конечно-разностной схемой для аппроксимации конвективных членов уравнений (второй порядок аппроксимации, монотонность) [1].

Пусть безразмерная плотность течения $\rho(x, y, z)$ равна $(1 - x/(2A) + S(x, y, z))$, где x — обезразмеренная на $d/2$ вертикальная координата декартовой системы координат (x, y, z) , связанной с телом, S — обезразмеренное возмущение солёности, $A = \Lambda/d$ — отношение масштабов, $\Lambda = g/N^2$, N , $T_b = 2 \cdot \pi/N$ — масштаб, частота и