

УДК 532.546

ВЛИЯНИЕ РАЗЛОМА ПЛАСТА НА ХАРАКТЕР ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ К ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЕ

© 2013 Н.А. Каримов¹

Построена модель фильтрации жидкости к добывающей скважине при наличии разломов нефтяного пласта. Эти разломы могут быть как высокопроницаемыми, так и низкопроницаемыми и характеризуются безразмерным коэффициентом проводимости F_{CD} . Для различных значений F_{CD} исследован характер процесса фильтрации, определен коэффициент продуктивности скважины, получено аналитическое выражение для величины скин-фактора, отражающего влияние трещины на продуктивность скважины.

Ключевые слова: фильтрация жидкости, высокопроницаемые трещины, малопроницаемые завесы, коэффициент продуктивности скважины, скин-фактор скважины с трещиной.

Введение

Определенная часть запасов нефти сосредоточена в трещиноватых коллекторах [1]. Характерной особенностью процесса разработки таких месторождений является несоответствие продуктивности скважин и проницаемости породы, существенная зависимость индикаторной кривой от давления и т. п. На месторождениях с трещиноватыми коллекторами часто основной приток нефти к скважине происходит через одну трещину. Наличием трещин объясняется также быстрый прорыв воды в добывающую скважину при заводнении [1]. Изучение фильтрации нефти в трещиноватых коллекторах представляет интерес также и с точки зрения применения методов гидравлического разрыва пласта (ГРП). Гидравлический разрыв пласта в настоящее время является одним из самых эффективных методов повышения нефтедобычи [2, 3]. В результате ГРП повышается дебит добывающих или приемистость нагнетательных скважин, а также повышается конечная нефтеотдача за счет приобщения к выработке слабодренлируемых зон и пропластков. Трещины, находящиеся в продуктивных коллекторах, в ряде случаев могут быть заполнены малопроницаемым материалом. В этом случае они имеют меньшую проницаемость, чем основная порода (т. н. завесы). В данной работе рассмотрены вопросы моделирования процесса фильтрации жидкости к скважине при наличии в пласте трещин (разломов) различной проницаемости,

¹Каримов Никита Анатольевич (n-neo@inbox.ru), кафедра теоретической механики Самарского государственного аэрокосмического университета (Национального исследовательского университета), 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

исследованию влияния таких разломов на характер процесса фильтрации жидкости к добывающей скважине и на величину продуктивности такой скважины с высокопроницаемой/малопроницаемой трещиной/завесой.

1. Постановка задачи и математическая модель

Рассмотрим плоский стационарный процесс фильтрации несжимаемой жидкости к вертикальной добывающей скважине в изотропной по проницаемости пористой среде. Данный процесс в плоскости (x, y) описывается уравнением несжимаемости и законом фильтрации Дарси

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \vec{V} = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p, \quad (1.1)$$

где $\vec{V}(x, y)$ — вектор скорости фильтрации жидкости, $p(x, y)$ — давление в жидкости, μ — вязкость жидкости, k — проницаемость пласта толщиной h .

В пласте с контуром питания радиуса R_c в точке $M_0(x_0, y_0)$ расположена добывающая скважина радиуса r_w с дебитом Q . Кроме этого, внутри контура питания расположена трещина длиной $2l$, толщиной 2δ ($\delta \ll l$) и проницаемостью k_f . Трещина ориентирована вдоль оси x , а центр ее совпадает с началом координат плоскости (x, y) .

Комплексный потенциал данной задачи в переменных $z = x + iy, \bar{z} = x - iy$ можно записать в виде (1.2)

$$\varphi(z) = q(\ln(z - z_0) + \sum_0^{\infty} c_n z^{-n}), \quad (1.2)$$

где $q = Q\mu/2\pi kh$ — приведенный дебит добывающей скважины.

2. Решение задачи

Традиционно решение данной задачи строится следующим образом [2]. Трещина аппроксимируется эллипсом с полуосями l и δ . Для описания течения жидкости внутри эллипса строится свой комплексный потенциал

$$\varphi_f(z) = q_f(\ln(z - z_0) + \sum_0^{\infty} d_n z^n), \quad (2.1)$$

где $q_f = Q\mu/2\pi k_f h$. Неизвестные коэффициенты a_n и d_n потенциалов (1.2) и (2.1) находятся из условий непрерывности давления p и нормальной компоненты вектора скорости V_n на границе пласт-трещина.

Учитывая, что $\delta \ll l$, в работе [4] было предложено заменить эллипс с полуосями l и δ разрезом нулевой толщины ($-l < x < l, y = 0$), а процесс фильтрации жидкости в трещине выразить в виде следующего граничного условия на разрезе:

$$F_{CD} \sqrt{l^2 - x^2} \operatorname{Re} \varphi'(x) = \operatorname{Im} \varphi(x), \quad (2.2)$$

где $F_{CD} = k_f \delta / kh$ — безразмерный коэффициент проводимости трещины [3].

Тогда, отобразив с помощью функции Жуковского $z = l(\nu + \nu^{-1})/2$ внешность разреза $-l < x < l, y = 0$ на внешность единичного круга $|\nu| = 1$, потенциал (1.2)

в новой переменной ν запишем как

$$\varphi(\nu) = q(\ln(\nu - \nu_0) + \sum_0^{\infty} C_n \nu^{-n}), \quad (2.3)$$

где $l\nu = z + \sqrt{z^2 - l^2}$, $l\nu_0 = z_0 + \sqrt{z_0^2 - l^2}$, $|\nu_0| > 1$.

Граничное условие (2.2) на разрезе $-l < x < l, y = 0$ в новой переменной ν можно представить в виде

$$\text{Im}(F_{CD}\nu\varphi'(\nu) - \varphi(\nu)) = 0, \nu = e^{i\theta} \quad (2.4)$$

Потенциал (2.3), удовлетворяющий граничному условию (2.4), будет иметь следующий вид:

$$\varphi(\nu) = q(\ln(\nu - \nu_0) + \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \frac{nF_{CD} - 1}{nF_{CD} + 1} (\overline{\nu_0}\nu)^{-n} + C_0), \quad (2.5)$$

Потенциал (2.5) удобнее представить в следующем виде:

$$\varphi(\nu) = q(\ln \frac{\nu - \nu_0}{1 - 1/\overline{\nu_0}\nu} - 2 \sum_1^{\infty} \frac{(\overline{\nu_0}\nu)^{-n}}{n(nF_{CD} + 1)} + C_0), \quad (2.6)$$

Учитывая, что $\ln 2(z - z_0)/l = \ln(\nu - \nu_0) + \ln(1 - 1/\nu_0\nu)$, в переменной z потенциал (2.6) можно записать как

$$\varphi(z) = q(\ln \frac{z - z_0}{(1 - 1/\nu_0\nu(z))(1 - 1/\overline{\nu_0}\nu(z))} - 2 \sum_1^{\infty} \frac{(\overline{\nu_0}\nu(z))^{-n}}{n(nF_{CD} + 1)} + C_0 + \ln \frac{2}{l}). \quad (2.7)$$

Характер течения жидкости к скважине при различных расположениях трещины и скважины и различных значениях коэффициента проводимости трещины F_{CD} изображен на рис. 1 и рис. 2.

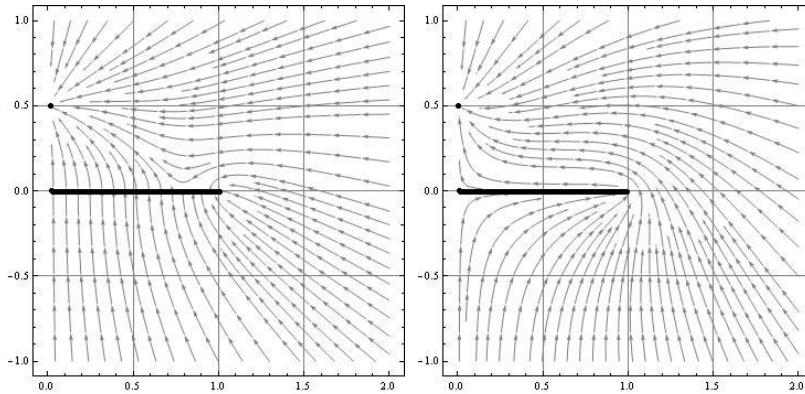


Рис. 1. Линии тока жидкости к скважине, расположенной в точке $(0, 0.5)$, при значениях $F_{CD} = \infty$ (слева) и $F_{CD} = 0$ (справа)

3. Коэффициент продуктивности скважины

Эффективность работы скважины выражается через безразмерный коэффициент продуктивности, обычно записываемый в виде [3]

$$J = \frac{q}{p_c - p_w} = (\ln \frac{R_c}{r_w} + S)^{-1}, \quad (3.1)$$

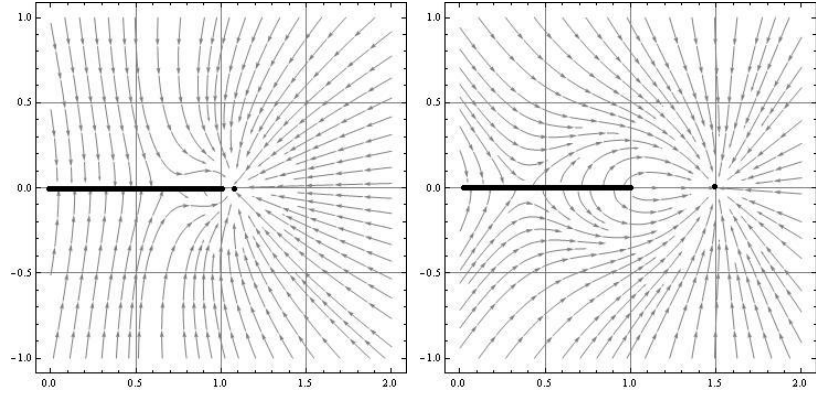


Рис. 2. Линии тока жидкости к скважине, расположенной в точке $(1.05, 0)$ (слева) и $(1.5, 0)$ (справа), при значении $F_{CD} = \infty$

где p_c — давление на контуре питания пласта, p_w — давление на забое скважины, S — скин-фактор скважины, определяющий степень отклонения течения от плоскорадиального при отсутствии трещины ($S = 0$).

Определив из выражения (2.7) для потенциала $\varphi(z)$ значения p_c и p_w , для величины S можно записать следующее выражение:

$$S = \ln |1 - \nu_0^{-2}| + \ln(1 - \rho_0^{-2}) + 2 \sum_1^{\infty} \frac{\rho_0^{-2n}}{n(nF_{CD} + 1)}. \quad (3.2)$$

В частности, при $\theta_0 = 0$ (рис. 2), когда $\nu_0 = \rho_0$, величина скин-фактора будет

$$S = 2 \ln(1 - \rho_0^{-2}) + 2 \sum_1^{\infty} \frac{\rho_0^{-2n}}{n(nF_{CD} + 1)} = -2F_{CD} \sum_1^{\infty} \frac{\rho_0^{-2n}}{nF_{CD} + 1} < 0. \quad (3.3)$$

При $\theta_0 = \pi/2$ (рис. 1), когда $\nu_0 = i\rho_0$, она примет следующее значение:

$$S = \ln(1 - \rho_0^{-4}) + 2 \sum_1^{\infty} \frac{\rho_0^{-2n}}{n(nF_{CD} + 1)}. \quad (3.4)$$

Для непроницаемых трещин (завес), когда $F_{CD} = 0$, величина S будет

$$S = \ln |1 - \nu_0^{-2}| - \ln(1 - \rho_0^{-2}), \quad (3.5)$$

а в высокопроницаемом случае, когда $F_{CD} = \infty$, она примет значение

$$S = \ln |1 - \nu_0^{-2}| + \ln(1 - \rho_0^{-2}) < 0. \quad (3.6)$$

Заключение

В работе дана постановка и решена задача о фильтрации жидкости к скважине при трещине различной проводимости F_{CD} . Для различных значений F_{CD} и различных расположений скважины и трещины исследован характер течения жидкости к скважине, построены линии тока, а также определен скин-фактор скважины, определяющий степень отклонения течения от плоскорадиального из-за наличия трещины.

Литература

- [1] Фазлыев Р.Т. Площадное заводнение нефтяных месторождений. М.; Ижевск: ИКИ, 2008. 256 с.
- [2] Каневская Р.Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1999. 212 с.
- [3] Экономидес М., Олини Р., Валко П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике. М.; Ижевск: ИКИ, 2007. 236 с.
- [4] Астафьев В.И., Федорченко Г.Д. Моделирование фильтрации жидкости при наличии трещины гидравлического разрыва пласта // Вестник СамГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. 2007. № 2(15). С. 128–132.

Поступила в редакцию 30/IX/2013;
в окончательном варианте — 1/X/2013.

INFLUENCE OF BRAKING OF LAYER ON THE CHARACTER OF THE PROCESS OF FLUID FILTRATION TO THE PRODUCTION WELLS

© 2013 N.A. Karimov²

A model of fluid filtration in the production well in the presence of cracks of oil layer is built. These expansions can be both highly permeable and low-permeable and are characterized by the dimensionless ratio of conductivity of F_{CD} . For different values of F_{CD} the nature of filtering process is investigated; factor of productivity of the well is defined, an analytical expression for the skin factor, which reflects the influence of fractures on the productivity of the well is obtained.

Key words: fluid filtration, highly permeable fractures, low permeability, productivity factor of the well, well skin factor with fracture

Paper received 30/IX/2013.

Paper accepted 1/X/2013.

²Karimov Nikita Anatolyevich (n-neo@inbox.ru), the Dept. of Theoretical Mechanics, Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russian Federation.