**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ
ДАВЛЕНИЯ В СКВАЖИНЕ ПОСЛЕ ЕЕ ОПРЕССОВКИ
ПРИ НАЛИЧИИ ПЛОСКОЙ ИЛИ КРУГОВОЙ ГРАНИЦ**

© И. Г. Хусаннов

*Башкирский государственный университет**Стерлитамакский филиал**Россия, Республика Башкортостан, 453103 г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.**Тел: +7 (906) 109 45 93.**Email: ivt30@mail.ru*

Получены нелинейные интегральные уравнения, описывающие релаксацию давления после опрессовки выделенного участка скважины, окруженной пластом с эффективным конечным радиусом, для случаев, когда круговая граница является непроницаемой или высокопроницаемой. Для выделенного участка скважины рассмотрены два случая: 1) вся боковая поверхность выделенного участка является проницаемой; 2) только часть боковой поверхности является проницаемой. Выполнены исследования зависимости процесса релаксации давления внутри скважины от высоты непроницаемого участка, а также от значений геометрических и коллекторских параметров пласта. Установлено, что, увеличивая высоту непроницаемого участка, можно управлять временем релаксации давления в скважине. Показано, что влияние круговой границы на процесс релаксации давления в скважине наблюдается только при малых значениях эффективного радиуса пласта.

Решена задача опрессовки скважины, находящейся в пласте с круговой границей. При этом на некотором расстоянии от скважины имеется плоская граница, для которой рассмотрены два случая: граница является проницаемой и непроницаемой. Боковая поверхность выделенного участка скважины также может быть проницаемой или частично проницаемой. Давление вокруг скважины принято в квазистационарном приближении. Выполнены исследования зависимости процесса релаксации давления в скважине после опрессовки от относительной длины непроницаемого участка, значения расстояния между скважиной и плоской границей, а также от коллекторских параметров пласта.

Ключевые слов: *пласт, эффективный радиус, релаксация давления, скважина, фильтрация, скорость, опрессовка.*

Введение

Эффективность и продолжительность использования нефтяных и газовых скважин во многом зависит от регулярной оптимизации процесса извлечения нефти и газа. Для этого необходимо организовать постоянный контроль параметров призабойной зоны, изменения объема добычи сырья [1–3]. Для исследования параметров, определяющих фильтрационные характеристики пласта, используют геофизические, гидродинамические и термодинамические способы [4–9].

Как правило, новые нефтегазовые месторождения имеют низкую проницаемость, сложное геологическое строение и повышенную вязкость нефти. Доля запасов нефти в России, относящиеся к трудноизвлекаемым, постоянно растет [10–11]. В связи с этим актуальной является разработка способов исследования параметров трудноизвлекаемых нефтяных месторождений.

В данной работе для исследования характеристик пластов с низкой проницаемостью предложен метод опрессовки с дополнительным введением газа. Суть метода опрессовки состоит в следующем: выбирается участок скважины, вокруг которого нужно исследовать параметры пласта, оба конца участка закрываются. Выбранный участок частично заполняется жидкостью и частично газом. В момент времени $t = 0$ в рассматриваемый участок вводится газ, и после этого давление в нем мгновенно увеличивается. Увеличение давления приведет к фильтрации жидкости через боковую поверхность скважины в пласт и восстановлению давления в рассматриваемом участке. Время релаксации давления в участке зависит от коллекторских характеристик пласта. Зная время релаксации давления можно примерно определить коллекторские характеристики пласта вокруг скважины [12–14].

Предлагаемый метод опрессовки имеет следующие преимущества: во-первых, является экспресс методом, во-вторых, изменяя начальную объемную долю газовой фазы можно управлять временем релаксации давления в выбранном участке скважины, чтобы она была приемлемой для технической реализации этого метода на практике. В связи с этим метод опрессовки особенно привлекателен при исследовании параметров пластов с низкой проницаемостью. Этот метод позволяет оперативно оценить фильтрационные характеристики пласта

для эксплуатационных скважин во время их кратковременной остановки, а также для разведочных скважин в процессе их бурения [12–14].

В [12] исследована задача опрессовки цилиндрической полости, окруженной пористой средой. Релаксация давления в полости описывается с помощью нелинейного интегрального уравнения, которое исследовано с использованием численного метода. Найдена связь между коллекторскими параметрами пласта и временем релаксации давления в полости.

В работах [13–14] рассмотрен случай опрессовки полости, когда вокруг полости пористая среда насыщена жидкостью. Установлена зависимость полупериода восстановления давления в полости от коллекторских характеристик пористой среды.

В отличие от предыдущих работ автора в данном случае рассматривается опрессовка скважины, находящаяся в центре пласта, который имеет эффективный радиус. Исследована зависимость времени релаксации давления внутри опрессованной скважины от эффективного радиуса пласта. Решена также задача, когда на некотором расстоянии d от скважины имеется высокопроницаемая или непроницаемая плоская граница. Исследована зависимость времени релаксации давления в скважине от расстояния d , а также от коллекторских характеристик пласта.

Постановка задачи

В исходном состоянии ($t < 0$) выделенный участок скважины содержит частично газ и частично жидкость, а давление жидкости в пласте вокруг этого участка равно некоторому постоянному значению p_0 . В начальный момент времени $t = 0$ происходит мгновенное увеличение давления в рассматриваемом участке скважины до некоторого значения p'_0 . За счет фильтрации жидкости в окружающую скважину среду давление в выделенном участке будет стремиться к значению p_0 .

Предполагается, что газ находится в специальной емкости с гофрированными или податливыми стенками и фильтрация газа в пласт отсутствует. Газ в емкости будет играть роль «объемной пружины», выталкивающей жидкость в окружающий скважину пласт.

При решении задачи сделано допущение, что давление внутри выделенного участка скважины однородно. Причем длина выделенного участка намного больше радиуса скважины, а торцы этого участка непроницаемы. Выделенный участок скважины длиной L состоит из двух частей: проницаемой (длиной L^{op}) и непроницаемой (длиной $L^{cl} = L - L^{op}$).

Запишем математическую модель задачи. Уравнение сохранения массы жидкости внутри скважины имеет вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{L^{op}}{L} \frac{2}{a} \rho_l v'. \quad (1)$$

Здесь $\rho = \rho_l(1 - \alpha_g)$, ρ_l – плотность жидкости, α_g – объемная доля газа в выделенном участке скважины, r – радиальная координата, a – радиус скважины, v' – скорость течения жидкости через стенку скважины.

Скорость фильтрации жидкости вокруг скважины v определяется через закон Дарси:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2)$$

где μ – вязкости жидкости, k – проницаемость пласта, p – давление жидкости в пласте. На границе $r = a$ выполняется условие неразрывности жидкости

$$v' = v|_{r=a}. \quad (3)$$

Поле давления в пласте описывается уравнением пьезопроводности [7]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad a < r < R_k < \infty, \quad \chi = \frac{k \rho_{l0} C^2}{m \mu}. \quad (4)$$

Здесь ρ_{l0} – начальное значение плотности жидкости, m – пористость пласта, C^2 – скорость звука в жидкости.

Начальное и граничные условия, когда пласт имеет конечный эффективный радиус R_k , имеют вид:

$$p = p_0, \quad t = 0, \quad r > a. \quad (5)$$

$$p = p'(t), \quad t > 0, \quad r = a, \quad (6)$$

$$p = p_0, \quad r = R_k. \quad (7)$$

В случае, когда рассматривается конечный закрытый пласт, то второе граничное условие

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad r = R_k. \quad (8)$$

Уравнение состояния для жидкости, находящейся в скважине и в пласте, примем в акустическом приближении:

$$p' = p'_0 + C^2(\rho_l - \rho_{l0}). \quad (9)$$

Газ внутри скважины считается калорически совершенным, и его состояние описывается политропическим законом:

$$\alpha_g = \alpha_{g0} (p'_0/p')^{1/\gamma}, \quad (10)$$

где α_{g0} – начальное значение объемной доли газа в выделенном участке скважины, γ – показатель политропы.

В течение всего периода релаксации давления в скважине после опрессовки плотность жидкости меняется мало ($\rho_l - \rho_{l0} \ll \rho_l$), в связи с этим в правой части уравнения (1) будем полагать $\rho_l = \rho_{l0}$. После этого интегрируем уравнение (1) по времени от 0 до t и получим:

$$\rho_l(1 - \alpha_g) - \rho_{l0}(1 - \alpha_{g0}) = -\rho_{l0} \frac{2L^{op}}{a} \int_0^t v|_{r=a} dt'. \quad (11)$$

Подставляя ρ_l и α_g из (9) и (10) в уравнение (11), после некоторых преобразований получим нелинейное интегральное уравнение, описывающее зависимость релаксации давления в скважине от скорости фильтрации жидкости через ее стенки:

$$\alpha_{g0}((p'_0/p')^{1/\gamma} - 1) - \frac{p' - p'_0}{\rho_{l0} C^2} (1 - \alpha_{g0}(p'_0/p')^{1/\gamma}) = -\frac{2kL^{op}}{a\mu} \int_0^t \frac{\partial p}{\partial r}|_{r=a} dt'. \quad (12)$$

Для определения правой части уравнения (12) решим уравнение (4) с переменным граничным условием (6) для конечного кругового пористого пласта вокруг скважины [15]:

$$p - p_0 = \int_0^t \frac{\partial U(r, t-t')}{\partial t} (p'(t') - p_0) dt', \quad (13)$$

$$U(r, t) = 1 - \frac{\ln r/a}{\ln R_k/a} + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha_n^2 \chi t) J_0^2(\alpha_n R_k) J_0^2(\alpha_n a) \Psi(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n a) - J_0^2(\alpha_n R_k)}$$

где $\Psi(\alpha_n r) = Y_0(\alpha_n R_k) J_0(\alpha_n r) - J_0(\alpha_n R_k) Y_0(\alpha_n r)$, а значения параметра α_n определяются из уравнения $\Psi(\alpha_n a) = 0$. Здесь $J_\theta(z)$ является функцией Бесселя первого рода порядка θ , а $Y_\theta(z)$ – функцией Бесселя второго рода порядка θ .

Когда рассматривается конечный закрытый пласт, то функция $U(r, t)$ будет иметь вид:

$$U(r, t) = 1 + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha_n^2 \chi t) J_1^2(\alpha_n R_k) J_0^2(\alpha_n a) \Psi'(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n a) - J_1^2(\alpha_n R_k)} \quad (14)$$

где $\Psi'(\alpha_n r) = Y_1(\alpha_n R_k) J_0(\alpha_n r) - J_1(\alpha_n R_k) Y_0(\alpha_n r)$, а значения параметра α_n определяются из уравнения $\Psi'(\alpha_n a) = 0$.

С помощью решения (13) из уравнения (12) получим интегральное уравнение, описывающее релаксацию давления в скважине, находящейся в центре пласта с эффективным конечным радиусом R_k :

$$\begin{aligned} \alpha_{g0} \left(\left(\frac{p'_0}{p'} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p' - p'_0}{\rho_{l0} C^2} \left(1 - \alpha_{g0} \left(\frac{p'_0}{p'} \right)^{1/\gamma} \right) = \\ = \frac{2kL^{op}}{a^2 \mu} \int_0^t \left(\frac{1}{\ln R} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-x_n^2 (t - t')/t_{al}) J_0^2(x_n R)}{J_0^2(x_n) - J_0^2(x_n R)} \right) (p'(t') - p_0) dt' \end{aligned} \quad (15)$$

где параметры R , x_n вычисляются с помощью формул $R = R_k/a$, $x_n = \alpha_n a$, а величины $x_1, x_2, \dots$ являются корнями уравнения:

$$Y_0(x_n R) J_0(x_n) - J_0(x_n R) Y_0(x_n) = 0.$$

Аналогично, используя решение (14), для случая конечного закрытого пласта из уравнения (12) получим:

$$\begin{aligned} \alpha_{g0} \left(\left(\frac{p'_0}{p'} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p' - p'_0}{\rho_{l0} C^2} \left(1 - \alpha_{g0} \left(\frac{p'_0}{p'} \right)^{1/\gamma} \right) = \\ = \frac{4kL^{op}}{a^2 \mu} \int_0^t \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-x_n^2 (t - t')/t_{al}) J_1^2(x_n R)}{J_0^2(x_n) - J_1^2(x_n R)} \right) (p'(t') - p_0) dt' \end{aligned} \quad (16)$$

где $x_1, x_2, \dots$ являются корнями уравнения:

$$Y_1(x_n R) J_0(x_n) - J_1(x_n R) Y_0(x_n) = 0.$$

Результаты численного решения

Формулы (15) и (16) были исследованы численным методом. Установления зависимости времени релаксации давления в выделенном участке скважины от величины границы R_k , от относительной высоты проницаемого участка $\frac{L^{op}}{L}$ и фильтрационных параметров кругового пласта.

На рис. 1 представлены графики, показывающие динамику релаксации давления в скважине ($\Delta p = p'(t) - p(t)$) при различных значениях эффективного радиуса R_k . Значения параметров пласта, скважины, газа и жидкости приняты следующие: $k=10^{-12} \text{ м}^2$, $a = 0.1 \text{ м}$, $\alpha_{g0} = 0.1$, $p'_0 = 10 \text{ МПа}$, $m=0.1$, $p_0=1 \text{ МПа}$, $\rho_{l0} = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $C = 1.5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $\mu = 0.001 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\gamma = 1.4$.

На рис. 2 показано влияние относительной длины (L^{op}/L) проницаемого участка боковой поверхности скважины на процесс релаксации давления в скважине после опрессовки. Значения параметров пласта, скважины, газа и жидкости приняты такие же, как на рис. 1. Линиям 1 и 2 соответствуют решения уравнения (15), а линиям 1' и 2' – (16).

Рис. 1. а) Динамика процесса релаксации давления в скважине при различных значениях эффективного радиуса R_k : линии 1 и 1' – 1 м, 2 и 2' – 10 м, 3 и 3' – 100 м. Линиям 1, 2 и 3 соответствуют решения уравнения (15), а линиям 1', 2' и 3' – (16). б) представление конечной стадии процесса релаксации давления, изображенной на рис. 1 а), в увеличенном виде.

Рис. 2. а) Зависимости релаксации давления в выделенном участке скважины после опрессовки от времени при наличии непроницаемого участка боковой поверхности. Значение эффективного радиуса R_k равно 5 м, линии 1 и 1' – $L^{op}/L = 1$, 2 и 2' – $L^{op}/L = 0.5$; б) представление конечной стадии процесса релаксации давления, изображенной на рис. 2 а), в увеличенном виде.

За характерный период полной релаксации давления в скважине в работе принято время, за которое значение Δp становится меньше 0.001 МПа. Из рис. 1 следует, что, чем меньше эффективный радиус пласта R_k , тем быстрее устанавливается давление в скважине. В случае конечного закрытого пласта с уменьшением значения эффективного радиуса R_k увеличивается зависимость времени релаксации давления от R_k . При эффективном радиусе больше 500 м для рассмотренных значений параметров скважины и пласта время релаксации давления в опрессованной скважине почти не зависит от R_k .

Из рис. 2 следует, что наличие непроницаемого участка боковой поверхности скважины приводит к увеличению времени релаксации давления после опрессовки. В частности, когда $L^{op} = L^{cl}$, время релаксации давления увеличивается в два раза. Этот факт можно использовать для управления временем процесса релаксации давления, чтобы она соответствовала значению, удобному для технического осуществления этого способа на практике при оценке границ кругового пласта.

Время релаксации давления в выделенном участке скважины после опрессовки зависит не только от величины границы R_k и фильтрационных параметров кругового пласта, но также от местонахождения границы продуктивного пласта. Этот факт можно использовать при навигации скважины в случае горизонтального бурения.

Постановка второй задачи

Рассмотрим случай, когда скважина находится в центре пласта с конечным эффективным радиусом R_k . Аналогично предыдущей задаче в исходном состоянии давление жидкости в пласте постоянно и равно значению p_0 , а внутри выделенного участка скважины длиной L , ограниченной герметичными торцами, частично содержится газ и частично жидкость. Выделенный участок скважины длиной L состоит из двух частей: прони-

цаемой (длиною L^{op}) и непроницаемой (длиною $L^{cl} = L - L^{op}$). В начальный момент времени $t=0$ давление в выделенном участке мгновенно увеличивается до значения p'_0 .

Масса всей газожидкостной системы внутри участка в исходном состоянии определяется по формуле:

$$M_0 = \pi a^2 L (\rho_{l0}(1 - \alpha_{g0}) + \rho_{g0} \alpha_{g0}). \quad (17)$$

Закон сохранения массы жидкости запишем в виде:

$$\frac{dM}{dt} = -\rho_l L^{op} Q, \quad Q = 2\pi a v', \quad M = \pi a^2 L \rho_l (1 - \alpha_g). \quad (18)$$

Система уравнений задачи включает закон Дарси (2), уравнения пьезопроводности (4) и состояния (9), (10), а также начальное (5) и граничные (3), (6) условия.

В этой задаче рассмотрим ситуацию, когда характерное время релаксации давления в скважине после опрессовки удовлетворяет условию: $\sqrt{\chi t_r} \ll R_k$. В этом случае распределение давления в пласте вокруг скважины в процессе релаксации давления в ней принимает квазистационарный профиль [15]:

$$p = \frac{(p_0 - p') \ln(r/a)}{\ln(R_k/a)} + p', \quad a < r < R_k. \quad (19)$$

Объемный расход жидкости на границе скважины на единицу высоты описывается формулой [15]:

$$Q = \frac{2\pi k L^{op} / L (p' - p_0)}{\mu \ln(R_k/a)}. \quad (20)$$

Рассмотрим случай, когда на расстоянии d от скважины имеется плоская граница (рис. 3), которая параллельна вертикальной оси скважины. В работе рассмотрены две ситуации, плоская граница является: а) непроницаемой ($v_n = 0$); б) высокопроницаемой. Когда плоская граница высокопроницаемая, то она является контуром питания. В этом случае давление на плоской границе постоянно ($p = p_0$). Исследуем процесс релаксации давления в выделенном участке после опрессовки при наличии плоской границы на некотором расстоянии d от скважины.

Рис. 3. Схематическое изображение скважины в центре пласта с конечным эффективным радиусом R_k и плоской границы на расстоянии d .

В приближении квазистационарных полей давления для рассматриваемых двух предельных ситуаций а) и б) значения объемных расходов жидкости на границе скважины на единицу высоты можно вычислить соответственно следующими формулами [15]:

$$\text{а): } Q = \frac{2\pi k L^{op} / L (p' - p_0)}{\mu \ln(R_k^2 / 2da)}, \quad \text{б): } Q = \frac{2\pi k L^{op} / L (p' - p_0)}{\mu \ln(2d/a)}. \quad (21)$$

Тогда на основе уравнения (18) с учетом формул (21) можно получить решение, описывающее релаксацию давления в выделенном участке скважины в неявной форме:

$$\int_{p'}^{p'_0} f(p) dp = t/t_{r(i)}, \quad f(p) = \frac{\alpha_c}{p - p_0} \left(1 - \alpha_{g0} \left(\frac{p'_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) + \frac{\alpha_{g0} p_0}{\gamma p (p - p_0)} \left(\frac{p'_0}{p} \right)^{1/\gamma}, \quad (22)$$

$$t_{r(1)} = \frac{a^2 \mu \ln(R_k/a)}{2p_0 k L^{op} / L}, \quad t_{r(2)} = \frac{a^2 \mu \ln(R_k^2 / 2da)}{2p_0 k L^{op} / L}, \quad t_{r(3)} = \frac{a^2 \mu \ln(2d/a)}{2p_0 k L^{op} / L}, \quad \alpha_c = \frac{p_0}{\rho_{l0} C^2}.$$

Для случая, когда плоская граница отсутствует значение индекса i равно 1; для непроницаемой границы i равно 2; для высокопроницаемой границы i равно 3.

Результаты решения второй задачи

На рис. 4 приведены зависимости времени релаксации давления $t_{r(i)}$ от величины расстояния плоской границы d при радиусе кругового пласта $R_k = 10$ м. Линии 1 получены для случая, когда вся боковая поверхность выделенного участка скважины является проницаемой ($L^{op}/L = 1$), линии 2 – боковая поверхность половины высоты выделенного участка скважины является проницаемой ($L^{op}/L = 0.5$). Тонкая горизонтальная линия относится к графику $t_{r(1)}$, пунктирная – $t_{r(2)}$, сплошная – к графику $t_{r(3)}$.

Рис. 4. Зависимости времени релаксации давления от расстояния плоской границы d при разных значениях относительной высоты проницаемого участка: линии 1 – ($L^{op}/L = 1$), линии 2 – ($L^{op}/L = 0.5$).

Исследования показали, что, изменяя высоту непроницаемого участка, можно управлять временем релаксации давления в скважине после опрессовки. Уменьшение относительной высоты проницаемого участка в два раза приводит к увеличению времени релаксации давления также в два раза. Увеличение значения начального давления в скважине при опрессовке в два раза приводит к аналогичному увеличению времени релаксации давления. Увеличение расстояния между плоской границей и скважиной в десять раз приводит к изменению времени релаксации давления примерно в полтора – два раза.

Выводы

Для описания релаксации давления в выделенном участке скважины после опрессовки получены нелинейные интегральные уравнения. Для выделенного участка скважины рассмотрены два случая: 1) вся боковая поверхность выделенного участка является проницаемой; 2) только часть боковой поверхности является проницаемой. Сама скважина окружена пластом с эффективным конечным радиусом. Для пласта также рассмотрены два случая: круговая граница является непроницаемой или высокопроницаемой. Установлено, что, чем меньше эффективный радиус пласта, тем быстрее устанавливается давление в скважине. В случае конечного закрытого пласта с уменьшением значения эффективного радиуса R_k увеличивается зависимость времени релаксации давления от R_k . При эффективном радиусе больше 500 м для рассмотренных значений параметров скважины и пласта время релаксации давления в опрессованной скважине почти не зависит от R_k . Показано, что наличие непроницаемого участка боковой поверхности скважины приводит к увеличению времени релаксации давления.

Решена задача опрессовки выделенного участка скважины, находящейся в центре пласта с конечным эффективным радиусом, при наличии плоской границы на некотором расстоянии от скважины. Выделенный участок скважины состоит из двух частей: проницаемой и непроницаемой. Для плоской границы также рассмотрены два случая: она является непроницаемой или высокопроницаемой. Исследован процесс релаксации давления в выделенном участке скважины после опрессовки при разных значениях параметров скважины и пласта. Установлено, что, изменяя высоту непроницаемого участка или значения начального давления в скважине при опрессовке, можно управлять временем релаксации давления. Показано, что увеличение расстояния между плоской границей и скважиной в десять раз приводит к изменению времени релаксации давления примерно в полтора – два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
2. Muskat M. Physical principles of oil production // McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1949. 607 p.
3. Молокович Ю. М., Непримеров Н. Н., Пикуза В. И., Штанин А. В. Релаксационная фильтрация. Казань: изд-во КГУ, 1980. 136 с.
4. Баренблатт Г. И., Максимов В. А. О влиянии неоднородностей на определение параметров нефтеносного пласта по данным нестационарного притока жидкости к скважинам // Изв. АН СССР, ОТН. 1958. №7. С. 49–55.
5. Баренблатт Г. И., Ю. П. Борисов, С. Г. Каменецкий и др. Об определении параметров нефтеносного пласта по данным о восстановлении давления в остановленных скважинах // Изв. АН СССР, ОТН. 1957. №11, С. 64–69.
6. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
7. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика: учебник для вузов. М.: Недра, 1993. 416 с.
8. Адиев А. Р., Крючатов Д. Н., Рамазанов А. Ш. Определение гидродинамических параметров пласта при геофизическом сопровождении свабирования малобитных скважин // Каротажник. 2012. №7. С. 168–178.
9. Козяр В. Ф., Глебачева Н. К., Медведев Н. Я. Выделение проницаемых пород-коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных испытаний) // НТВ «Каротажник». 1999. Вып. 56. С. 52–59.

10. Якуцени В. П., Петрова Ю. Э., Суханов А. А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. №2. С. 1–11.
11. Муллакаев М. С. Современное состояние проблемы извлечения нефти // Современная научная мысль. 2013. №4. С. 185–191.
12. Шагапов В. Ш., Хусаинова Г. Я., Хусанов И. Г., Хафизов Р. М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. №3. С. 106–112.
13. Хафизов Р. М., Хусаинов И. Г., Шагапов В. Ш. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой породой, при ее опрессовке введением газа // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. №1. С. 109–118.
14. Хафизов Р. М., Хусаинов И. Г., Шагапов В. Ш. Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине // ПММ. 2009. Т. 73. Вып. 4. С. 615–621.
15. Muskat M. The flow of homogeneous fluids through porous media // McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 1946. 628 p.

Поступила в редакцию 23.04.2019 г.

После доработки – 19.01.2020 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.1.1

MODELLING OF THE PRESSURE RELAXATION PROCESS IN A WELL AFTER THE PRESSURE TESTING IN THE PRESENCE OF FLAT OR CIRCULAR BORDERS

© I. G. Khusainov

*Bashkir State University, Sterlitamak branch
49 Lenin Avenue, 453103 Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (906) 109 45 93.

Email: ivt30@mail.ru

The nonlinear integrated equations describing pressure relaxation after pressure testing of the allocated site of the well surrounded with layer with an effective final radius for cases when the circular border is impenetrable or highly permeable are received. Dependences of time of a relaxation of pressure on value of effective radius and collection characteristics of layer are studied. It is established that increase in effective radius leads to reduction of extent of influence of circular border for the period of pressure relaxation in the well. The task of pressure testing of the allocated site of the well that is located in a layer with an effective final radius in the presence of flat border at some distance from the well is solved within quasistationary approximation for the pressure field in the layer. The dependences of pressure relaxation rate on the distance between the flat border and the well, on initial value of test pressure and on collection characteristics of the layer were studied. It was established that at pressure testing of the well with a radius of 0.1 m, which is located in a layer with an effective final radius of 10 m, when the distance between the flat border and the well was changed from 0.25 to 4 m, the time of pressure relaxation changed for more than twice in duration.

Keywords: layer, effective radius, pressure relaxation, well, filtration, speed, pressure testing.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. Dvizhenie zhidkostei i gazov v prirodnykh plastakh [The movement of liquids and gases in natural reservoirs]. Moscow: Nedra, 1984.
2. Muskat M. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1949.
3. Molokovich Yu. M., Neprimerov N. N., Pikuza V. I., Shtanin A. V. Relaksatsionnaya fil'tratsiya [Relaxation filtration]. Kazan': izd-vo KGU, 1980.
4. Barenblatt G. I., Maksimov V. A. Izv. AN SSSR, OTN. 1958. No. 7. Pp. 49–55.
5. Barenblatt G. I., Yu. P. Borisov, S. G. Kamenetskii i dr. Ob opredelenii parametrov neftenosnogo plasta po dannym o vosstanovlenii davleniya v ustanovlennykh skvazhinakh. Izv. AN SSSR, OTN. 1957. No. 11, Pp. 64–69.
6. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. Teoriya nestatsionnoi fil'tratsii zhidkosti i gaza [The theory of nonstationary filtration of fluid and gas]. Moscow: Nedra, 1972.
7. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. Podzemnaya gidromekhanika: uchebnik dlya vuzov [Underground hydromechanics: textbook for universities]. Moscow: Nedra, 1993.
8. Adiev A. R., Kryuchatov D. N., Ramazanov A. Sh. Karotazhnik. 2012. No. 7. Pp. 168–178.
9. Kozyar V. F., Glebocheva N. K., Medvedev N. Ya. NTV «Karotazhnik». 1999. No. 56. Pp. 52–59.
10. Yakutseni V. P., Petrova Yu. E., Sukhanov A. A. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2007. No. 2. Pp. 1–11.
11. Mullakaev M. S. Sovremennaya nauchnaya mysl'. 2013. No. 4. Pp. 185–191.
12. Shagapov V. Sh., Khusainova G. Ya., Khusainov I. G., Khafizov R. M. Fizika gorenii i vzryva. 2002. Vol. 38. No. 3. Pp. 106–112.
13. Khafizov R. M., Khusainov I. G., Shagapov V. Sh. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2006. Vol. 47. No. 1. Pp. 109–118.
14. Khafizov R. M., Khusainov I. G., Shagapov V. Sh. PMM. 2009. Vol. 73. No. 4. Pp. 615–621.
15. Muskat M. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 1946.

Received 23.04.2019.

Revised 19.01.2020.