

УДК 622.276.279

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕПРЕССИЙ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ЗАКОНЕ ФИЛЬТРАЦИИ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ГАЗ-ВОДА

Каширина К.О.

ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень, Российская Федерация, (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: kashirina_k_o@mail.ru

Задача о притоке реального газа к несовершенной скважине при нелинейном законе фильтрации является весьма сложной и до сих пор не получила точного аналитического решения. Здесь рассматривается задача о притоке реального газа к несовершенной скважине в однородно-анизотропном пласте, т. е. с учетом анизотропии, а также предлагается несколько иной подход к расчету фильтрационных сопротивлений, обусловленных несовершенством скважины по степени вскрытия. Методика расчета безводных дебитов в случае притока реального газа к несовершенной скважине по нелинейному закону фильтрации при наличии подошвенной воды рассматривалась в работе других авторов. Однако сама задача о предельных безводных дебитах в точной постановке не решена из-за того, что не известно уравнение границы раздела двух жидкостей при наличии конуса подошвенной воды.

Ключевые слова: методика расчета, реальный газ, несовершенная скважина, подошвенная вода, безводный дебит, фильтрационные сопротивления.

THE METHOD OF ULTIMATE DEPRESSION CALCULATION AT NON-LINEAR FILTRATION LAW IN THE CONDITIONS OF STABLE GAS-WATER BOUNDARY

Kashirina K.O.

Federal state budget higher professional educational institution "Tyumen State Oil and Gas University", Tyumen, Russian Federation (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: kashirina_k_o@mail.ru

The problem of real gas inflow to the imperfect well at non-linear filtration law is very complex and still has not got an exact analytical solution. In the article there is observed the problem of the real gas inflow to the imperfect well in a homogeneous-anisotropic formation, i.e. taking into account the anisotropy, and also there is suggested a slightly different approach to the calculation of the filtration resistance caused by the partially penetrating well. The method of water-free production rate calculation in the case of real gas inflow to the imperfect well at non-linear filtration law in the presence of bottom water has been already observed in the works of the other authors. However, the task of water-free production rate limits has not been solved exactly due to the fact that there is no equation of the boundary between two fluids in the presence of bottom water cone.

Keywords: calculation method, real gas, imperfect well, bottom water, water-free production rate, filtration resistance.

Задача о притоке реального газа к несовершенной скважине при нелинейном законе фильтрации является весьма сложной и до сих пор не получила точного аналитического решения. В работах Е.М. Минского, А.Е. Хейна, Г.А. Зотова, С.М. Тверковкина и др. рассматривалась данная задача в приближенной постановке. Здесь рассматривается задача о притоке реального газа к несовершенной скважине в однородно-анизотропном пласте, т. е. с учетом анизотропии, а также предлагается несколько иной подход к расчету фильтрационных сопротивлений, обусловленных несовершенством скважины по степени вскрытия.

В работе Е.М. Минского [1] показано, что коэффициент фильтрационного сопротивления как при линейном, так и при квадратичном законе фильтрации зависит только от геометрии потока. В связи с этим к выводу уравнения притока газа можно подойти следующим образом. Для нелинейного закона фильтрации имеем уравнение

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{K_r} v + \frac{\rho_z}{l} v^2 \quad (1)$$

где

ρ_z – плотность газа.

Геометрия потока, очевидно, будет определяться функцией $h = h(r)$ в области пространственного потока $r_c \leq r \leq R_0$ (рисунок 1). Вся трудность решения состоит в нахождении уравнения кривой $h = h(r)$, ограничивающей область потока, или, другими словами, уравнения линии тока. Размер зоны пространственного движения будет зависеть от многих факторов, например, не только от геометрии пласта (R_k, h_0, b), но и от анизотропии пласта α^* , дебита Q , градиента давления ($gradP$) и т. д. Следуя И.А. Чарному [5], примем радиус зоны пространственного притока $R_0 = h_0$. Будем аппроксимировать упомянутую линию тока уравнением вида [4]

$$h(r) = h_0 \left[1 - \left(1 - \bar{h} \right) \left(\frac{r_c}{r} \right)^n \right], \quad (2)$$

где

$n = n(\bar{R}, \bar{h}, \rho_0)$ – некоторая функция, зависящая от несовершенства скважины по степени вскрытия, геометрии пласта и скважины, анизотропии пласта.

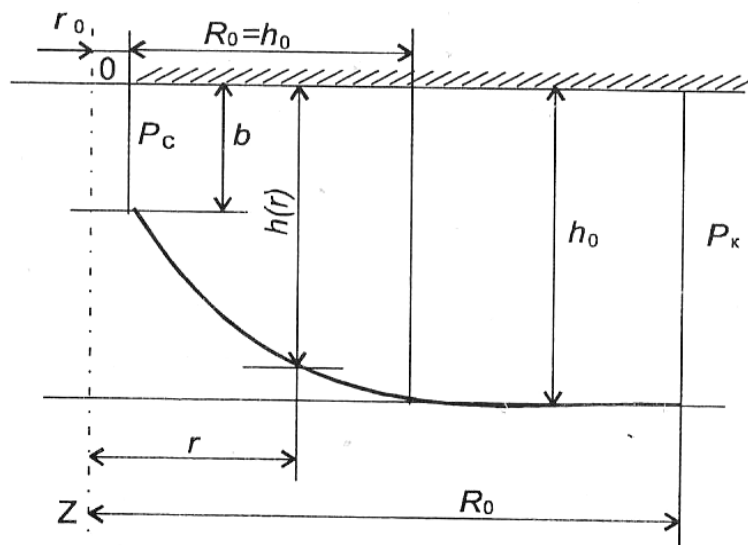


Рис.1. Двухзонная схема притока газа к несовершенной скважине при нелинейном законе фильтрации

Умножая левую и правую части уравнения (1) на $\rho_z(P)$, применяя двухзонную схему притока (см. рисунок 1), учитывая уравнение состояния реального газа, уравнение (2) и интегрируя в соответствующих пределах по давлению и радиусу, после некоторых преобразований получаем известную двучленную формулу притока:

$$P_k^2 - P_c^2 = AQ + BQ^2, \quad (3)$$

где

$$A = a \left(\ln \frac{R_0}{r_c} + C_1 + C_0 \right); \quad (4)$$

$$B = \frac{b}{r_c} (1 + C_1 + C_2); \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{h} \ln \frac{\bar{R}^n + \bar{h} - 1}{\bar{h}} - \ln \bar{R}; \quad C_2 = C_2(\rho, \bar{h}, \bar{R}); \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\mu(\bar{P})Z(\bar{P})T_{nl}P_{cm}}{\pi K_z h_0 Z_{cm} T_{cm}}; \quad b = \frac{\rho_{CT} Z(\bar{P}) P_{cm} T_{nl}}{2\pi^2 h_0^2 l Z_{cm} T_{cm}}. \quad (7)$$

Выражение для C_2 представляется сложной функцией, выраженной суммой рядов от 1 до ∞ и зависящей от параметров $n = n(\rho, \bar{h}, \bar{R})$ и \bar{h}, \bar{R} [4], где

$$\bar{R} = \frac{h_0}{r_c}; \quad \bar{h} = \frac{b}{h_0}; \quad \rho = \frac{1}{\alpha^*}; \quad \alpha^* = \sqrt{\frac{K_r}{K_z}}. \quad (8)$$

Коэффициент фильтрационного сопротивления C_1 , обусловленный относительным вскрытием пласта \bar{h} , определяется формулой [2]

$$C_1 = \left(\frac{1}{\bar{h}} - 1 \right) \ln \frac{h_0}{r_c} - \frac{1}{\bar{h}} \psi(\rho, \bar{h}), \quad (9)$$

где

$\psi(\rho, \bar{h})$ – некоторая функция, связанная с распределением потенциала скорости фильтрации, вызванного работой несовершенной скважины, рассчитана на ЭВМ, затабулирована и представлена графиками (рисунок 2).

Из совместного решения (6) и (9) определена функция $n = n(\rho, \bar{h}, \bar{R})$, рассчитана на ЭВМ, затабулирована в широком диапазоне параметров и представлена графическими зависимостями (рисунок 2). При найденных значениях n функция $C_2 = C_2(\rho, \bar{h}, \bar{R})$, также была рассчитана на ЭВМ в широком диапазоне параметров и затабулирована.

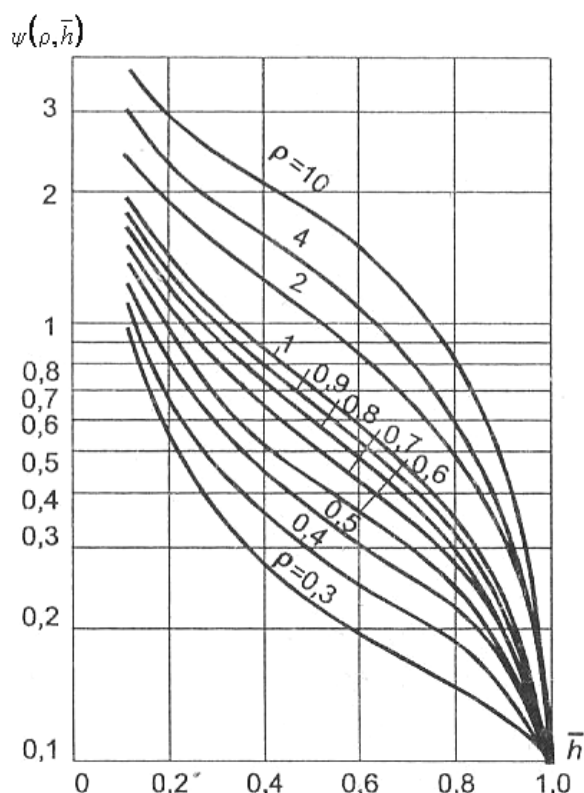


Рис.2. Зависимость функции $\psi(\rho, \bar{h})$, связанной со средним значением потенциала скважины, от относительного вскрытия пласта \bar{h}

Методика расчета безводных дебитов в случае притока реального газа к несовершенной скважине по нелинейному закону фильтрации при наличии подошвенной воды рассматривалась в работе [6]. Однако сама задача о предельных безводных дебитах в точной постановке не решена из-за того, что не известно уравнение границы раздела двух жидкостей при наличии конуса подошвенной воды.

Приведем приближенное решение этой задачи, используя приближенное уравнение границы раздела, когда конус воды находится в предельно-устойчивом положении [2]:

$$r = R_0 e^{-x}; \quad x = \frac{h_0^2 - h(r)^2}{2h_0^2 q(\rho_0, \bar{h})}; \quad \rho_0 = \frac{R_0}{\alpha^* h_0} \quad (10)$$

где

$q(\rho_0, \bar{h})$ – безразмерный предельный безводный дебит, определяемый по известным формулам, графикам или таблицам [2].

Переменная толщина пласта, ограничивающая область пространственного притока, как это следует из (10), выражается формулой вида

$$h(r) = h_0 \sqrt{1 - 2q(\rho_0, \bar{h}) \ln\left(\frac{R_0}{r}\right)}. \quad (11)$$

Умножая левую и правую части уравнения (1) на $\gamma_2(P)$, учитывая, что объемный предельный дебит $Q=Q_0q(\rho_0, \bar{h})$ и (11), получаем формулу притока, выраженную через предельный безразмерный дебит, из которой легко определить предельную депрессию ΔP_{np}

$$P_k^2 - P_c^2 = aQ_0 \int_{r_c}^{R_0} \frac{r^{-1} dr}{r \sqrt{1 - 2q(\rho_0, \bar{h}) \ln \frac{R_0}{r_c}}} + bQ^2 \int_{r_c}^{R_0} \frac{r^{-2} dr}{\sqrt{1 - 2q(\rho_0, \bar{h}) \ln \frac{R_0}{r_c}}} \quad (12)$$

После интегрирования и некоторых преобразований уравнение притока примет вид (3), где A и B определяются по формулам (4) и (5), в которых коэффициенты представляются выражениями:

$$C_1 = \frac{1}{q(\rho_0, \bar{h})} \left[1 - \sqrt{1 - 2q(\rho_0, \bar{h}) \ln \bar{R}} \right] - \ln \bar{R}; \quad \bar{R} = \frac{R_0}{r_c}; \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{\exp\left(\frac{1}{-2q(\rho_0, \bar{h})}\right)}{2q(\rho_0, \bar{h})} \left\{ Li \left[\exp \frac{1}{2q(\rho_0, \bar{h})} \right] - Li \left[\bar{R} \exp \frac{1}{2q(\rho_0, \bar{h})} \right] \right\}; \quad (14)$$

где

C_0 – коэффициент за счет перфорации,

$Li(x)$ – интегральный логарифм, который связан с интегральной показательной функцией $Ei(x)$ зависимостью

$$\int_0^x \frac{dt}{\ln t} = Li(x) = Ei(\ln x). \quad (15)$$

При $x > 1$ интеграл (15) расходится в точке $t=1$. В этом случае $Li(x)$ представляет значение несобственного интеграла.

Заметим, что из полученных формул притока для несовершенной скважины как частный случай вытекают формулы для линейного закона фильтрации.

Пример: Скважина работает при наличии устойчивого положения границ раздела. Исходные данные $R_0=1000$ м; $a^*=1$; $r_c=0,1$ м; $h_0=10$ м; $b=4$ м. Тогда имеем следующие безразмерные параметры: $\rho_0=100$; $\bar{h}=0,4$; $\bar{R}=10^4$. Требуется определить фильтрационные сопротивления, обусловленные наличием конуса воды.

По графикам [3] определяем безразмерный предельный безводный дебит:

$q(\rho_0, \bar{h})=q(100;0,4)\approx 0,4$. По формуле (13) находим $C_1\approx 2,3$ и по формуле (15) подсчитываем

$C_2\approx 2,9$. Как видим, значения C_1 и C_2 оказались сравнительно небольшими, это объясняется

тем, что предельный безводный дебит очень мал, а он и определяет геометрию потока, т. е.

форму конуса подошвенной воды. После чего предельная депрессия $\Delta P_{пр}$ легко подсчитывается по формуле (12).

Список литературы

1. Минский Е.М. О турбулентной фильтрации газа в пористых средах. – ВНИИ сб. «Вопросы добычи, транспорта и переработки природных газов». – М.: Гостоптехиздат, 1951.
2. Телков А.П., Грачев С.И., Краснова Т.Л., Сохошко С.К. Особенности разработки нефтегазовых месторождений. – ООО НИПИКБС-Т. – 2000. – 328 с., часть I.
3. Телков А.П., Грачев С.И., Краснова Т.Л., Сохошко С.К. Особенности разработки нефтегазовых месторождений. – ООО НИПИКБС-Т. – 2000. – 328 с., часть II.
4. Телков А.П. Установившийся приток реального газа к несовершенной скважине в ограниченном пласте. – НТС «Проблемы нефти и газа Тюмени». – 1978. – Вып. 37. – С. 34-54.
5. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: ГТТИ, 1963. – 396 с.
6. Эксплуатация газовых и газоконденсатных скважин, вскрывших пласты с подошвенной водой/ З.С. Алиев, А.П. Власенко, Ю.П. Коротаев, Е.С. Абрамов, С.А. Андреев // ВНИИИЭГазпром, НТО. Серия: Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – М., 1975. – 72 с.

Рецензенты:

Грачев С.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ВПО ТюмГНГУ, г. Тюмень;

Леонтьев С.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ВПО ТюмГНГУ, г. Тюмень.