УДК 532.685

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ БЕЗВОДНЫХ ДЕБИТОВ И ДЕПРЕССИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕННЫХ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА

Каширина К.О., Забоева М.И.

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

В работах Е.М. Минского, А.Л. Хейна, Г.А. Зотова, С.М. Тверковкина, З.С. Алиева и иных рассматривалась данная задача в приближенной постановке. Задача о притоке реального газа к несовершенной вертикальной 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 с учетом анизотропии, на основе теории потенциала, а также предлагается несколько иной подход к расчету фильтрационных сопротивлений, обусловленных несовершенством скважины по степени вскрытия и нелинейным законом фильтрации. На основе теории потенциала разработана методика определения предельных безводных дебитов и депрессий вертикальных газовых скважин в более строгой постановке задачи (использование двухзонной схемы притока, учет анизотропии пласта, средневзвешенного давления, добавочных фильтрационных сопротивлений).

Ключевые слова: методика расчета, безводный дебит, вертикальная скважина, несовершенная скважина, газовая скважина, теория потенциала

THE METHOD OF THE WATER-FREE PRODUCTION RATE LIMITS AND IMPERFECT VERTICAL GAS WELLS' PRESSURE DRAWDOWNS CALCULATION ON THE BASIS OF POTENTIAL THEORY

Kashirina К.О., Zaboeva M.I.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, The Russian Federation, (625000, Tyumen, Volodarskogo Str, 38), e-mail: kashirina_k_o@mail.ru

E. M. Minsky, A. L. Hein, G. A. Zotov, S. M. Tverkovkin, Z. S. Aliyev and others have considered this problem in their works, in approximate formulation. The problem of the real gas inflow to the imperfect vertical well under nonlinear filtration law is rather complicated and has not an exact analytical solution yet.
There is considered the problem of the real gas inflow to the imperfect well in homogeneous anisotropic layer with a glance of anisotropy, on the basis of potential theory, and also there is suggested a slightly different approach to the calculation of the filtration resistance caused by the well imperfection due to partial penetration and nonlinear filtration law. There is worked out the method of determination of the water-free production rate limits and imperfect vertical gas wells' pressure drawdown in a more strict formulation of the problem (using a two-zone scheme of the inflow, the anisotropic layer, the average pressure, additional filtration resistance)

Key words: calculation method, water-free production rate, vertical well, imperfect well, gas well, potential theory

В работах Е.М. Минского, А.Л. Хейна, Г.А. Зотова, С.М. Тверковкина, З.С. Алиева и иных[1] рассматривалась данная задача в приближенной постановке. Здесь рассматривается задача о притоке реального газа к несовершенной скважине в однородно-анизотропном пласте в более строгой постановке, т.е. с учетом анизотропии, на основе теории потенциала, а также предлагается несколько иной подход к расчету фильтрационных сопротивлений, обусловленных несовершенством скважины по степени вскрытия и нелинейным законом фильтрации.

В связи с этим к выводу уравнения притока газа можно подойти следующим образом. Для нелинейного закона фильтрации Е.М. Минским и И.А. Чарным предложено уравнение:

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K_r} v + \frac{\rho_г}{l} v^2 \qquad (1)$$

где v – скорость фильтрации; $\rho_г$ – плотность газа; l – коэффициент макрошероховатости [2].

Геометрия потока, очевидно, будет определяться функцией $h=h(r)$ в области пространственного движения $r_c \le r \le R_o$ (рис. 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_o, b), но и от анизотропии пласта $æ^*$, дебита, Q, градиента давления ($gradP$) и т.д.). И.А. Чарный [3] и М. Маскет [4] предлагают принимать радиус зоны пространственного притока $R_o=h_o$. Будем аппроксимировать упомянутую линию тока уравнением вида [2]:

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

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

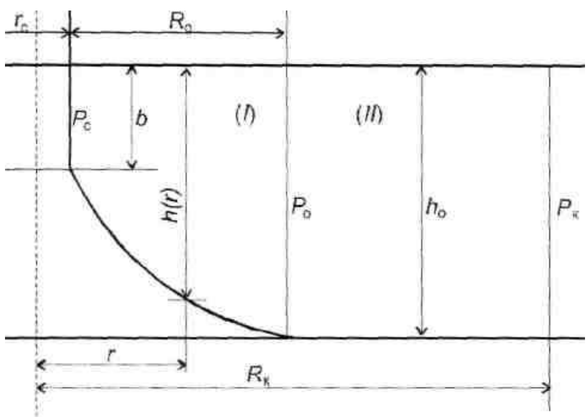

Рис. 1. Двухзонная схема притока к несовершенной скважине, обусловленного нелинейным законом фильтрации

Умножая левую и правую части уравнения (1) на $\rho_г(P)$, применяя двухзонную схему притока и принимая размер зоны пространственного притока $R_o=h_o$, учитывая уравнение состояния реального газа, вводя добавочные фильтрационные сопротивления C_1, C_2 и C_o, обусловленные относительным вскрытием, нарушением линейного закона Дарси и перфорацией колонны, и интегрируя в соответствующих пределах по давлению и радиусу, после некоторых преобразований получаем известную двучленную формулу притока:

$$P_0^2 - P_c^2 = A_1 Q + B_1 Q^2 \qquad (3)$$

где

$$A_1 = a\left(\ln\frac{R_o}{r_c} + C_1 + C_o\right);\; B_1 = \frac{b}{r_c}\left(1 + C_1 + C_2\right) \qquad (4)$$

$$C_1 = C_1\left(\rho, \bar{h}, \bar{R}\right);\; C_2 = C_2\left(\rho, \bar{h}, \bar{R}\right) \qquad (5)$$

$$a = \frac{\mu\left(\bar{P}\right)Z\left(\bar{P}\right)T_{пл}P_{ст}}{\pi K_r h_o Z_{ст} T_{ст}};\; b = \frac{\rho_{ст} Z\left(\bar{P}\right)T_{пл}P_{ст}}{2\pi^2 h_o^2 l Z_{ст} T_{ст}} \qquad (6)$$

$$\bar{R} = \frac{h_o}{r_c};\; \bar{h} = \frac{b}{h_o};\; \rho = \frac{1}{æ^*};\; æ^* = \sqrt{\frac{K_r}{K_z}} \qquad (7)$$

$$C_o = \frac{1}{\bar{h}}\left[\ln\frac{4r_c}{l_o} - \frac{æ^*}{ml_o}\ln\left(2\pi\eta_o m\right)\right] \qquad (8)$$

Обозначения в формулах общепринятые.

Для внешней зоны двучленная формула записывается как приток к «укрупненной» скважине радиуса R_o=h_o (см. рис. 1):

$$P_к^2 - P_o^2 = A_2 Q + B_2 Q^2 \qquad (9)$$

где

$$A_2 = \ln\frac{R_к}{h_o};\; B_2 = \frac{1}{h_o} \qquad (10)$$

Решая совместно (3) и (9) с учетом (4), и (10), получаем уравнения притока, характеризующие всю область дренирования:

$$P_к^2 - P_c^2 = AQ + BQ^2 \qquad (11)$$

$$\left.\begin{aligned} A &= a(\ln\frac{R_к}{r_c} + C_1 + C_o); \\ B &= \frac{b}{r_c}\left[\frac{r_c}{h_o} + (1 + C_1 + C_2)\right]. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Значения добавочных фильтрационных сопротивлений определяются по таблицам и графикам [5].

Для определения предельной депрессии по формуле (11) необходимо знать предельный безводный дебит $Q_{пр}$ газовой скважины при нелинейном законе фильтрации. Решение этой задачи связано с распределением потенциала в случае притока реального газа к несовершенной скважине. Такое решение пока не получено.

Используем уравнение для распределения потенциала скорости фильтрации Φ при линейном законе в случае притока несжимаемой жидкости к несовершенной скважине [6, 7]:

$$\underset{\xi>\bar{h}}{\Phi-\Phi_o}=\frac{Q}{\pi\bar{h}h_o}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{Ch\frac{\mu_i(1-\xi)}{\rho}Sh\left(\frac{\mu_i}{\rho}\bar{h}\right)J_o\bar{R}_o\mu_i}{\mu_i^2 Sh\left(\frac{\mu_i}{\rho}\right)J_1^2\mu_i},\qquad(13)$$

где

$$\rho=\frac{R_o}{æ^* h_o};\ \xi=\frac{Z}{h_o};\ \bar{R}_o=\frac{r}{R_o};\ \bar{h}=\frac{b}{h_o};\ æ^*=\sqrt{\frac{K_r}{K_z}}\qquad(14)$$

где Q – расход жидкости; h_o – продуктивная толщина пласта; $\bar{h}$ – относительное вскрытие пласта; μ_i положительный корень уравнения $J_o(\mu_i)=0$; $J_o(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка; $Sh(x)$ и $Ch(x)$ – гиперболический синус и косинус; R_o – радиус контура питания; $æ^*$ – анизотропия пласта; Φ_o – потенциал на контуре питания; Φ – потенциал в любой точке пласта.

Преобразуем уравнение (13) для притока газа путем замены объемного расхода Q на весовой G и давления P на функцию Лейбензона:

$$\Phi=\int\gamma(P)dP+Const\qquad(15)$$

Используя уравнение газового состояния:

$$\gamma(P_o)=\gamma_{ст}\frac{P_o}{\alpha_o P_{ст}};\ \alpha=\frac{Z(\tilde{P})T_{пл}}{Z_{ст}T_{ст}}\qquad(16)$$

интегрируя (15), обозначая сумму ряда уравнений (13) при $\bar{R}_o=0$ через функцию $F(\xi,\rho,\bar{h})$, переходя от потенциала к давлению и решая совместно (13) и (15), получаем при $r=r_cF(\xi,\rho,\bar{h})$:

$$\underset{r=r_c}{P^2(r_c,\xi)}=P_o-\frac{2Q\mu P_{ат}\alpha}{\pi K_r\bar{h}h_o}F(\xi,\rho,\bar{h})\qquad(17)$$

Условие устойчивости конуса подошвенной воды определяется по закону Паскаля [2, 6]:

$$\underset{r=r_c}{P(0,\xi)}=P_o-\Delta\gamma h_o(1-\xi);\ \Delta\gamma=\gamma_в-\gamma_г\qquad(18)$$

Пусть предельная высота вершины конуса (см. рис.) определяется ординатой $\xi=\xi_o$. Тогда, решая совместно (17) и (18), после ряда преобразований получим формулу для безразмерного предельного дебита газовой скважины:

$$q(\rho_o,\bar{h})=\frac{Q_{пр}}{Q_o}=q_{ж}(\rho,\bar{h})\frac{P_o}{\alpha P_{ат}(1+m)}\left(1-\frac{1-\xi_o}{P^*}\right),\qquad(19)$$

где

$$q_ж\left(\rho_o, \bar{h}\right) = \frac{\bar{h}}{2} \frac{\left(1-\xi_o\right)}{F\left(\xi_o, \rho, \bar{h}\right)}; P^* = \frac{2P_o}{\Delta\gamma h_o} \quad (20)$$

$$Q_o = \frac{2\pi K_r h_o^2 \Delta\gamma}{\mu} \quad (21)$$

Здесь $q_ж\left(\rho_o, \bar{h}\right)$ – функция безразмерного предельного дебита по жидкости рассчитана на ЭВМ в широком диапазоне параметров ξ_o, ρ и $\bar{h}$, затабулирована и представлена графическими зависимостями [6, 8, 9]; P_o – начальное средневзвешенное пластовое давление газовой залежи; $\xi_o = \frac{z_o}{h_o}$ – ордината вершины устойчивого конуса воды.

Из соотношения (19) следует формула для предельного безводного расхода газа:

$$Q_{пр} = Q_o \frac{P_o q_ж\left(\rho, \bar{h}\right)}{\alpha P_{ат}\left(1+m\right)}\left(1 - \frac{1-\xi_o}{P^*}\right) \quad (22)$$

Параметр m определяет термодинамический характер расширения газа при фильтрации его из области высокого давления в область пониженного [3]. При m=1 происходит изотермическое расширение газа. В случае адиабатического расширения $m = \frac{C_v}{C_p}$ (C_v и C_p – удельные теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении соответственно).

Следует заметить, что предельный безводный дебит $q_ж\left(\rho, \bar{h}\right)$, формула (20), рассчитывается в широком диапазоне параметров $\rho_o = R_o / æ^* h_o$ и $\bar{h} = b/h_o$ по всему удельному объему дренирования [6,8], где R_o – условный радиус контура питания, составляющий половину расстояния между скважинами. Однако можно получить наиболее строгое решение исходя из двухзонной схемы притока (см. рис.).

Для внутренней зоны радиуса R_o=h_o согласно (13) при ξ=ξ_o имеем:

$$\Phi_o - \Phi\left(o, \xi\right) = \frac{QF\left(\xi_o, \rho_o, \bar{h}\right)}{\pi \bar{h} h_o}. \quad (23)$$

Для внешней зоны в соответствии с притоком жидкости к укрупненной фиктивной скважине радиуса R_o=h_o по формуле Дюпюи находим:

$$\Phi_к - \Phi_o = \frac{Q}{2\pi h_o} \ln \frac{R_к}{h_o}. \quad (24)$$

Совместное решение приведенных уравнений дает:

$$\Phi_o - \Phi\left(o, \xi\right) = \frac{Q_{пр} F\left(\xi_o, \rho_o, \bar{h}\right)}{\pi \bar{h} h_o} + \frac{Q_{пр}}{2\pi h_o} \ln \frac{R_к}{h_o}, \quad (25)$$

где $\xi_o = z_o / h_o$ – безразмерная ордината вершины конуса воды; z_o – ордината вершины конуса воды; $\rho_o = R_o / h_o = 1$ – параметр размещения $R_o = h_o$.

Состояние предельно устойчивого конуса выразим по уравнению Паскаля:

$$\varPhi_o - \varPhi(o, \xi) = \frac{K_r \Delta\gamma h_o}{\mu}(1 - \xi_o). \tag{26}$$

Решая совместно (25) и (26), после ряда преобразований получаем:

$$Q_{пр} = Q_o q^*(\rho_o, \bar{h}); \; q^*(\rho_o, \bar{h}) = \left[\frac{1}{q_{ж}(\rho, \bar{h})} + \frac{\ln \frac{R_к}{h_o}}{1 - \xi_o} \right]^{-1} \tag{27}$$

где Q_o – определяется по формуле (21).

Для расчета предельного дебита газовой скважины следует в формуле (22) вместо $q_{ж}(\rho, \bar{h})$ принять $q^*(\rho_o, \bar{h})$ по формуле (27).

Выводы

1. На основе теории потенциала разработана методика определения предельных безводных дебитов и депрессий вертикальных газовых скважин в более строгой постановке задачи (использование двухзонной схемы притока, учет анизотропии пласта, средневзвешенного давления, добавочных фильтрационных сопротивлений).
2. Приведены практические расчеты.

Список литературы

1. Алиев З.С., Андреева С.А., Власенко А.П., Коротаев Ю.П. Технологический режим работы скважин. – М.: Недра, 1978. — 289 с.
2. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Пер. с англ. Гостоптехиздат. — 1949. — 626 с.
3. Телков А.П. Подземная гидрогазодинамика. Уфа, 1974.–224 с.
4. Телков А.П., Грачёв С.И. и др. Особенности разработки нефтегазовых месторождений (Ч. II). – Тюмень: из-во ОООНИПИКБС-Т, 2001. — 482 с.
5. Телков А.П., Грачёв С.И. и др. Пространственная фильтрация и прикладные задачи разработки нефтегазоконденсатных месторождений и нефтегазодобычи. – Тюмень, из-во ОООНИПИКБС-Т, 2001. — 460 с.
6. Телков А.П., Грачёв С.И. и др. Особенности разработки нефтегазовых месторождений (Часть I). – Тюмень: из-во ОООНИПИКБС-Т, 1999–2000. — 328 с.

7. Телков А.П., Стклянин Ю.И. Образование конусов воды при добыче нефти и газа. М.: Недра, 1965.

8. Стклянин Ю.И. Точное решение задачи о потенциале точечного стока в однородно-анизотропном пласте с осевой симметрией и конечным радиусом контура питания. ПМТФ АН СССР, 1962, № 2.

9. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. — 352 с.

Рецензенты:

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

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