УДК 672.323

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОБАВОЧНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРЕДЕЛЬНО-УСТОЙЧИВЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ КОНУСА ПОДОШВЕННОЙ ВОДЫ, И ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕПРЕССИЕЙ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ЗАКОНЕ ФИЛЬТРАЦИИ

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

Известно, строгого решения поставленной задачи не имеется. Теория конусообразования Маскета – Чарного исходит из допущения, что отклонение поверхности раздела двух фаз от первоначальной плоской формы не влияет на распределение потенциала скоростей фильтрации в нефтяной части пласта. Строгое решение было бы возможным, если бы был известен профиль конуса. Еще большие трудности представляет задача о предельных безводных дебитах газовых скважин в условиях нелинейного закона фильтрации, когда решения о распределении потенциала вообще не имеется. Обычно в таких случаях безразмерный предельный безводный дебит для газовой скважины определяют по нефти, а предельную депрессию рассчитывают по хорошо известной двухчленной формуле для нелинейного закона фильтрации. Это первое допущение. Вторым допущением при этом является то, что добавочные фильтрационные сопротивления принимаются из решения притока к несовершенной скважине, что ведет к завышению предельных размерных дебитов.

Ключевые слова: методика расчета, фильтрационные сопротивления, конусообразование, предельные депрессии, безводный дебит.

CALCULATITION METHOD OF ADDED FILTRATION RESISTANCE DETERMINED BY ULTIMATE STEADY POSITION OF THE BOTTOM WATER CONE AND ULTIMATE DEPRESSION AT NON-LINEAR FILTRATION LAW

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

There is no any rigorous solutions of the given task. The coning theory of Muskat – Charney is based on the assumption that the deviation of the surface between two phases from initial flat shape does not affect the potential distribution of the filtration rates in the oil-saturated part of the reservoir. A rigorous solution would be possible if the profile of the cone was known. Even more difficult task is connected with water-free production rate limits of the gas wells in the conditions of non-linear filtration law when there is no any solution, concerning the potential distribution.Usually in such cases the dimensionless water-free production rate limit for gas well is determined by oil, and ultimate depression is calculated by the well-known binomial formula for non-linear filtration law. This is the first assumption. The second assumption is that added filtration resistances are taken from the inflow solution to the imperfect well that leads to the overstating of the ultimate dimensional production rates.

Keywords: calculation method, filtration resistance, coning, ultimate depression, water-free production rate.

Известно, строгого решения поставленной задачи не имеется. Теория конусообразования Маскета – Чарного исходит из допущения, что отклонение поверхности раздела двух фаз от первоначальной плоской формы не влияет на распределение потенциала скоростей фильтрации в нефтяной части пласта [1, 2]. Строгое решение было бы возможным, если бы был известен профиль конуса. Еще большие трудности представляет задача о предельных безводных дебитах газовых скважин в условиях нелинейного закона фильтрации, когда решения о распределении потенциала вообще не имеется.

Обычно в таких случаях безразмерный предельный безводный дебит для газовой скважины определяют по нефти, а предельную депрессию рассчитывают по хорошо известной двухчленной формуле для нелинейного закона фильтрации. Это первое допущение. Вторым допущением при этом является то, что добавочные фильтрационные сопротивления принимаются из решения притока к несовершенной скважине, что ведет к завышению предельных размерных дебитов.

Для более строгого подхода к решению этой задачи добавочные фильтрационные сопротивления надо принимать из условия предельно- устойчивого границы двух жидкостей. Рассмотрим эту задачу.

Принимаем двухзонную схему притока (см. рисунок 1). Для зоны пространственного притока I имеем дифференциальное уравнение $-\frac{dP}{dr}=\frac{\mu}{K_r}\upsilon+\frac{\rho_г}{l}\upsilon^2$.

Умножая левую и правую части на плотность газа $\rho(P)$ и выражая ее по уравнению состояния реального газа в осредненных параметрах вязкости $\mu(\overline{P})$ и коэффициента сверхсжимаемости газа $Z(\overline{P})$, разделяя переменные, в интегральной форме получаем:

$$\mathrm{P}_o^2-\mathrm{P}_c^2=ah_oQ\int_{r_c}^{h_o}\frac{dr}{rh(r)}+\text{в}\mathrm{h}_\mathrm{o}^2Q^2\int_{r_c}^{h_o}\frac{dr}{r^2h^2(r)}, \qquad (1)$$

где

$$a=\alpha\frac{\mu(\overline{P})}{\pi \mathrm{K}_r h_o};\quad \text{в}=\alpha\frac{\rho_{\text{ст}}(\overline{\mathrm{P}})}{2\pi^2h_o^2l};\quad \alpha=\mathrm{P}_{\text{ат}}\frac{Z(\overline{\mathrm{P}})\mathrm{T}_{\text{пл}}}{Z_{\text{ст}}\mathrm{T}_{ст}}. \qquad (2)$$

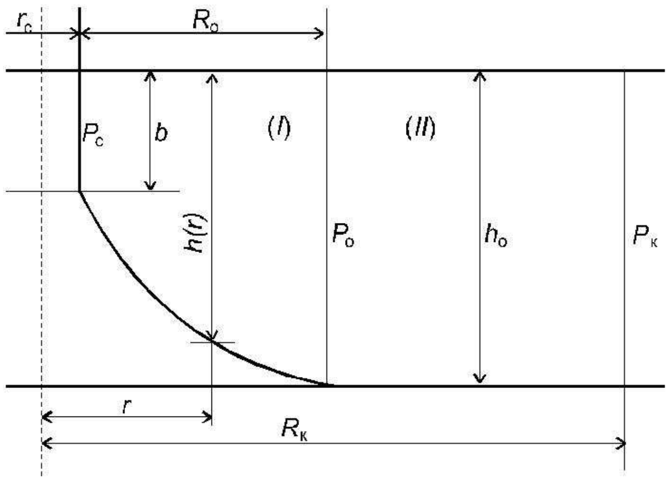

Рис.1. Двухзонная схема притока к несовершенной скважине, обусловленного нелинейным законом фильтрации

Границу раздела в вертикальном сечении (конус) будем аппроксимировать специальной функцией, изображение которой называется «Локоном Аньези» [1]

$$h(r)=\frac{4Z_o^3}{r^2+4Z_o^2}, \qquad (3)$$

Z_o – ордината вершины конуса в предельно-устойчивом положении (см. рисунок), определяемая для соответствующего безразмерного предельного дебита [2, 3, 4, 5].

В формулах (2) l – коэффициент макрошероховатости, остальные обозначения общеприняты.

Внося (3) в (1), интегрируя и делая ряд преобразований, получаем:

$$\mathrm{P}_o^2 - \mathrm{P}_c^2 = A_1 Q + \mathrm{B}_1 Q^2; \qquad (4)$$

$$A_1 = a\left[\ln\frac{h_o}{r_c} + C_1(\xi_o, h^*)\right]; \quad \mathrm{h}^* = \frac{h_o}{r_c}; \qquad (5)$$

$$C_1(\xi_o, h^*) = \left(\frac{1}{\xi_o} - 1\right)\ln\frac{h_o}{r_c} + \frac{1}{8\xi_o^2}; \qquad (6)$$

$$B_1 = \frac{в}{r_c}\left[1 + C^*(\xi_o)\right]; \quad \mathrm{C}^*(\xi_o) = \left(\frac{1}{\xi_o} - 1\right). \qquad (7)$$

Для зоны плоско-радиального притока II (см. рисунок) имеем:

$$\mathrm{P}_к^2 - \mathrm{P}_c^2 = A_2 Q + \mathrm{B}_2 Q^2; \qquad (8)$$

$$A_2 = a\ln\frac{R_к}{h_o}; \quad \mathrm{B}_2 = \frac{в}{r_c}. \qquad (9)$$

Решая совместно (4) и (8) и учитывая (5) и (9), получаем:

$$\mathrm{P}_к^2 - \mathrm{P}_c^2 = AQ + \mathrm{BQ}^2, \qquad (10)$$

где

$$A = a\left[\ln\frac{\mathrm{R}_к}{r_c} + C_1(\xi_o, h^*)\right]; \qquad (11)$$

$$B = \frac{в}{r_c}\left[1 + C_2(\xi_o)\right]; \quad \mathrm{C}_2(\xi_o) = \frac{1}{\xi_o}. \qquad (12)$$

Чтобы рассчитать предельную депрессию по формуле (8), необходимо вначале определить предельный безводный дебит $Q = Q_{пр}$.

В соответствии с формулой (19) для двухзонной схемы притока (при m=1 и $R_o = h_o$) имеем:

$$Q_{пр} = Q_o q(\rho, \bar{h}); \; Q_o = \frac{2\pi \mathrm{K}_г h_o^2}{\alpha \mathrm{P}_{ат}}\Delta\rho g; \; \Delta\rho = \rho_в - \rho_г; \qquad (13)$$

$$\rho = \frac{1}{æ^*}; \quad æ^* = \sqrt{\frac{\mathrm{K}_r}{\mathrm{K}_z}}; \quad \bar{\mathrm{h}} = \frac{b}{h_o};$$

где:

$q(\rho, \bar{h})$ – безразмерный предельный безводный дебит, определяемый по таблицам или графикам [3, 4, 5];

$\rho_в$ и $\rho_г$ – плотности воды и газа в пластовых условиях.

Внося (13) в (10) и учитывая (11), (12) и (2), после ряда преобразований получаем формулу для расчета предельной депрессии в виде:

$$\Delta P_{пр} = P_к \left[1 - \sqrt{1-(X+Y)}\right], \qquad (14)$$

$$X = q\left(\rho, \bar{h}\right)\Delta\rho g h_o \frac{1}{P_к}\left[\ln\frac{h_o}{r_c} + C_1(\xi_o, h^*)\right]; \qquad (15)$$

$$Y = q^2(\rho, \bar{h})\frac{(K_г h_o \Delta\rho\, g)^2 \rho_{cm}}{2\alpha\mu^2 P_{am} l r_c}\left[1 + C_2^*(\xi_o)\right]. \qquad (16)$$

Преимущество формулы (14) перед другими известными состоит в том, что она учитывает добавочные фильтрационные сопротивления, обусловленные предельно-устойчивым положением конуса подошвенной воды, и уточняет результаты расчета путем использования двухзонной схемы притока, что в конечном счете приводит к увеличению расчетных значений предельного дебита $Q_{пр}$ и предельной депрессии $\Delta P_{пр}$.

Проанализируем формулы добавочных фильтрационных сопротивлений (6) и (12), обусловленных относительным вскрытием, по линейному и нелинейному законам фильтрации на конкретном примере. Принимаем исходные данные: h_o=10 м; r_c=0,1 м; ρ=1; $\bar{h}$=0,5; $h^* = \frac{h_o}{r_c} = 100.$

По таблице [3, 4, 5] находим безразмерный предельный дебит $q\left(\rho; \bar{h}\right) = q(1; 0,5) = 0,548$ и соответствующую ему безразмерную ординату вершины конуса $\xi_o = 0,765$, что составляет размер высоты вершины от ГВК $У_к$=3,25 м. По формуле (6) определяем $C_1(\xi_o, h^*)$ =1,629; по формуле (12) имеем $C_2(\xi_o)$ =1,307.

По таблице [6, 7] определяем фильтрационные сопротивления, обусловленные притоком к несовершенной скважине, с любым дебитом: $C_1(\rho, \bar{h}, h^*) = 3,249$ и $C_2\left(\rho, \bar{h}, h^*\right) = 2,439$.

Как видим, завышение последних над первым и в данном примере в 2 раза. Очевидно, и в других случаях завышение останется существенным. Такое явление вполне объяснимо. При дебитах выше предельных деформированная поверхность раздела двух жидкостей, относительно быстро продвигаясь по оси скважины, претерпевает «точку возврата» [2] и начинается прорыв воды к забою, вызывающий большие фильтрационные сопротивления. В то время как, предельные безводные дебиты, значительно уменьшающие скорости фильтрации, обеспечивают плавное обтекание «холмообразного» поднятия первоначально плоского раздела двух жидкостей, резко снижая фильтрационные сопротивления.

Интересно отметить и тот факт, что фильтрационное сопротивление (6), характеризующее приток по линейному закону, также является функцией одних и тех же параметров $(\rho,\ \bar{h},\ h^*)$, что и при притоке к несовершенной скважине с какими угодно дебитами. Фильтрационное сопротивление $C_2(\xi_o)$ оказывается по величине обратно пропорциональной величине ординаты вершины конуса $\xi_o = f(\bar{h})$, которая определяется относительным вскрытием $\bar{h}$. Чем меньше $\bar{h}$, тем меньше ξ_o.

Следует заметить, что в приведенном нами примере пласт принимался однородно-изотропным, т.е. коэффициент анизотропии $æ^*$=1 при $\rho = R_o/æ^* h_o$=1 (R_o=h_o). М. Маскет и И. А. Чарный при $\rho \geq 1$ рекомендуют принимать размер зоны пространственного движения, равным R_o=1÷2h_o.

Исследуем формулу (3), записав ее в безразмерном виде:

$$h^*(r) = \frac{4\xi_o^3}{r^{*2} + 4\xi_o^2}, \qquad (17)$$

где:

$$h^*(r) = \frac{h(r)}{h_o};\ \xi_\text{o} = \frac{Z_o}{h_o};\ \text{r}^* = \frac{r}{h_o}. \qquad (18)$$

Принимаем $æ^*$=2, тогда зона пространственного движения R_o=5 м при толщине пласта h_o=10 м; при $r = R_o = 5$ м и $\xi_o = 1$ получаем $h^*(\xi)$=0,9846, следовательно, $h(r = 5\ м) = h_o h^* = 10 \cdot 0{,}9846 = 9{,}846$ м. Как видим, практически уравнение (17) условию на контуре зоны пространственного движения удовлетворяет. При $r^* = o$ из (17), получаем $\text{h}^*(r) = \xi_o$, т.е. получаем точно размер ординаты вершины конуса.

Выводы

Рассмотренный метод существенно уточняет решение задач теории конусообразования, позволяет построить профиль конуса, оценить остаточные запасы углеводородов в удельном объеме дренирования и определить приближенно зону пространственной фильтрации в анизотропных пластах. Функция (17), называемая «Локон Аньези», вполне приемлема для описания профиля конуса воды в предельно устойчивом состоянии.

Список литературы

1. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде (пер. с англ.). Гостоптехиздат. – 1949. – 626 с.

2. Телков А. П., Грачев С. И. и др. Особенности разработки нефтегазовых месторождений (Часть II). – Тюмень: Изд-во ОООНИПИКБС-Т, 2001. – 482 с.

3. Телков А. П., Грачев С. И. и др. Пространственная фильтрация и прикладные задачи

разработки нефтегазоконденсатных месторождений и нефтегазодобычи. – Тюмень: Изд-во ОООНИПИКБС-Т, 2001. – 460 с.
4. Телков А. П. Подземная гидрогазодинамика. – Уфа, 1974. – 224 с.
5. Телков А. П., Стклянин Ю. И. Образование конусов воды при добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1965.
6. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 396 с.
7. Zana F. T., Tomas G. W. Some Effects of Contaminents on Real Gas Flow. – JPT, No. 9. Sept. – 1970.

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.