Литература

1.Ушвицкий Л. И., Бинатов Ю. Г., Дубовик И. А. Эффективность развития нефтяного комплекса юга России. Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. 174 с.

2.Макаркин Д. Н. Развитие методологии определения экономической эффективности воспроизводства минерально-сырьевого потенциала нефтегазового комплекса: автореф. дис. … д-ра эконом. наук. ВИЭМС. М. 2012. 39 с.

3. Черняев М. В. Инновационные экологически безопасные технологии, позволяющие повысить нефте- и газоотдачу горизонтальных нефтяных и газовых скважин // Экономика и предпринимательство. М. 2013, № 6. С. 632–635.

4.Материалы научно-технического отчета «Дополнение к проекту разработки Ковыльного месторождения». ООО «НК «Роснефть»-НТЦ». 2011. С. 125–140.

УДК 622.276.5.001.5

Васильев Владимир Андреевич, Гунькина Татьяна Александровна

МЕТОД РАСЧЕТА ЗОНЫ ДРЕНИРОВАНИЯ СКВАЖИНАМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В статье представлены формулы притока газа к горизонтальным, вертикальным скважинам, а также к вертикальной трещине гидроразрыва. Приведенные решения позволяют сопоставлять различные технологии повышения продуктивности скважин и предотвращения осложнений на основе единой математической модели.

Ключевые слова: зона дренирования, конфигурация скважины, коэффициенты фильтрационных сопротивлений, приток газа, математическая модель фильтрации

Vasilev Vladimir A., Gunkina Tatyana A.

METHOD OF CALCULATING DRAINAGE AREA WELLS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS

Obtain formulas of gas inflow to the horizontal, vertical wells, as well as the vertical hydraulic fracture. The above solutions allow to compare different technologies to increase the productivity of wells and the prevention of complications based on a unified mathematical model.

Key words: drainage area, the configuration of the well, the coefficients of filtration resistance, the flow of gas, the mathematical model of filtering

Геометрия зоны дренирования зависит от типа скважины и ее конфигурации: вертикальная, наклонная, горизонтальная, с расширенным стволом, с трещиной гидроразрыва и др.

Для построения поля скоростей и давлений в зоне дренирования широко используются численные методы интегрирования уравнения фильтрации в двух и трехмерном пространстве. В конечном итоге устанавливается зависимость дебита скважины от депрессии на пласт.

Однако, предлагаемые рядом авторов приближенные формулы дают вполне приемлемые результаты в сравнении с численными методами.

Многие аналитические решения основаны на использование плоской модели фильтрационных потоков. Для решения каждой из плоских задач используется метод отображения источников и стоков, эквивалентных сопротивлений, метод комплексного потенциала и другие. Широкое применение нашел метод схематизации зоны дренирования эллипсоидальной формой.

В работе [1] приведено решение задачи о притоке газа *к горизонтальной скважине*, расположенной симметрично в изотропном пласте постоянной толщины. Форма зоны дренирования принята эллипсоидальной.

Газодинамические исследования газовых скважин подтверждают нелинейную зависимость дебита от депрессии на пласт.

Уравнение притока газа, в этом случае, имеет вид:

$$P_{пл}^2 - P_{заб}^2 = AQ + BQ^2, \tag{1}$$

где $P_{пл}$ – пластовое давление; $P_{заб}$ – забойное давление; Q – дебит газа при нормальных условиях; A и B – коэффициенты фильтрационных сопротивлений.

Коэффициенты фильтрационных сопротивлений A и B определяют по результатам газодинамических исследований. Аналитически эти коэффициенты могут быть представлены в виде:

$$A = \frac{a}{K} f_a(r,h); \tag{2}$$

$$B = \frac{b}{\sqrt{K}} f_в(r, h); \tag{3}$$

где a и $в$ – коэффициенты, учитывающие свойства газа, пласта и термодинамические условия,

$$a = \frac{\mu P_o TZ}{T_o}; \tag{4}$$

$$в = \beta \frac{\rho_o P_o TZ}{T_o}; \tag{5}$$

где T_o, P_o – температура и давление при нормальных условиях (T_o = 273K; P_o = 760 мм рт. ст.); Т – пластовая температура; Z – коэффициент сверхсжимаемости газа (средний по зоне дренирования); K – коэффициент проницаемости; r_c – радиус скважины; h – толщина пласта; β – коэффициент вихревых сопротивлений; μ – коэффициент динамической вязкости газа; ρ_o – плотность газа; $f_a(r, h)$ и $f_в(r, h)$ – функции геометрических размеров зоны дренирования пласта скважиной.

Для вертикальной гидродинамически совершенной скважины имеем [2]:

$$f_a(r, h) = \frac{1}{\pi h} \ln \frac{R_к}{r_c}; \tag{6}$$

$$f_в(r, h) = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_к} \right). \tag{7}$$

где $R_к$ – радиус зоны дренирования пласта скважиной.

В работе [1], принимая за аналог модель притока газа к вертикальной скважине, уравнение фильтрации представлено в виде:

$$\frac{dp}{dF} = \frac{\mu \upsilon}{2\pi \hat{E} h} + \beta \frac{\rho \upsilon^2}{2\pi \sqrt{\hat{E}}\, h}, \tag{8}$$

где F – площадь фильтрации.

Выразив скорость фильтрации через расход газа при нормальных условиях:

$$\upsilon = \frac{Q_o}{F} \frac{P_o TZ}{PT_o}, \tag{9}$$

и разделяя переменные, получили:

$$\int PdP = \frac{\mu P_o Q_o TZ}{2\pi \hat{E} h T_o} \int \frac{dF}{F} + \beta \frac{\rho_o P_o Q^2{}_o TZ}{2\pi \sqrt{\hat{E}}\, h T_{\hat{i}}} \int \frac{dF}{F^2}. \tag{10}$$

Для притока газа к горизонтальной скважине значения интегралов в правой части уравнения (10) имеют вид:

$$\int \frac{dF}{F} = \ln \frac{\hat{a}_{\acute{y}}^2 + \frac{2}{\pi} l^2}{\sqrt{\hat{a}_{\acute{y}}^2 + l^2}} + \frac{h}{2l} \ln \hat{a}_{\acute{y}}; \tag{11}$$

$$\int \frac{dF}{F^2} = -\frac{1}{2\pi h}\,\frac{\sqrt{\hat{a}_{\acute{y}}^2+\ell^2}}{\hat{a}_{\acute{y}}^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}+\frac{h^2}{4l^2}\,\frac{1}{\hat{a}_{\acute{y}}}, \tag{12}$$

где l – полудлина горизонтальной скважины; $в_э$ – малая полуось эллипса.

В конечном итоге, получены функции геометрических размеров зоны дренирования пласта горизонтальной скважиной в виде:

$$f_a(\ell,h)=\frac{1}{2\pi h}\left(\ln\frac{R_{\hat{e}}{}^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}{\sqrt{R_{\hat{e}}{}^2+\ell^2}}\;\frac{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2+\ell^2}}{\left(\frac{h}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}\;+\;\frac{h}{2\ell}\ln\frac{h}{2r_c}\right); \tag{13}$$

$$f_{\hat{a}}(\ell,h)=\frac{1}{4\pi^2h^2}\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2+\ell^2}}{\left(\frac{h}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}\;-\;\frac{\sqrt{R_{\hat{e}}{}^2+\ell^2}}{R_{\hat{e}}{}^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}\;+\;\frac{h^2}{4\ell^2}\left(\frac{1}{r_c}-\frac{2}{h}\right)\right). \tag{14}$$

Анализ показал, что полученное в [1] решение может быть адаптировано к расчету зоны дренирования скважинами иной конфигурации.

Приток пластовой жидкости *к вертикальной трещине гидроразрыва* имеет свои особенности. Трещина вскрывает пласт на всю его толщину. Фильтрация пластовой жидкости обусловлена точечным стоком, расположенным в центре эллипса с полуосями l и $\delta/2$, постоянными в любом поперечном сечении трещины, где l – глубина трещины, δ – раскрытие трещины. Вторая зона фильтрации (в окрестности щели) отсутствует.

Из схематизации зоны дренирования пласта вертикальной трещиной гидроразрыва имеем пределы интегрирования: $\hat{a}_{\acute{y}}=R_{\hat{e}}\quad \grave{e}\quad \hat{a}_{\acute{y}}=\frac{\delta}{2}$.

Тогда интегралы (11) и (12) будут равны:

$$\int_{\frac{\delta}{2}}^{R_k}\frac{dF}{F}=\ln\left(\frac{R_k^2+\frac{2}{\pi}l^2}{\sqrt{R_k^2+l^2}}\cdot\frac{\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+l^2}}{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}l^2}\right); \tag{15}$$

$$\int_{\frac{\delta}{2}}^{R_k}\frac{dF}{F^2}=\frac{1}{2\pi h}\left[\frac{\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\ell^2}}{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}-\frac{\sqrt{R_{\hat{e}}{}^2+\ell^2}}{R_{\hat{e}}{}^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}\right] \tag{16}$$

и функции геометрических размеров зоны дренирования пласта трещиной гидроразрыва принимают вид:

$$f_a(\ell,h)=\frac{1}{2\pi h}\ln\left(\frac{R_k^2+\frac{2}{\pi}l^2}{\sqrt{R_k^2+l^2}}\cdot\frac{\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+l^2}}{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}l^2}\right); \tag{17}$$

$$f_{\hat{a}}\left(\ell, h\right)=\frac{1}{4\pi^2 h^2}\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\ell^2}}{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2+\frac{2}{\pi}\ell^2}-\frac{\sqrt{R_{\hat{e}}^{\,2}+\ell^2}}{R_{\hat{e}}^{\,2}+\frac{2}{\pi}\ell^2}\right). \quad (18)$$

При $R_к >> \ell >> \delta$ формулы (17) и (18) приводятся к виду:

$$f_a(\ell, h)=\frac{1}{2\pi h}(\ln\frac{\pi R_{\hat{e}}}{2\ell}); \quad (19)$$

$$f_{\hat{a}}(\ell, h)=\frac{1}{4\pi^2 h^2}(\frac{\pi}{2\ell}-\frac{1}{R_{\hat{e}}}). \quad (20)$$

В работе Р. Д. Каневской [3] приводится формула, подобная (19), с несколько другими коэффициентами под логарифмом.

Наконец, пределы интегрирования из схематизации зоны дренирования пласта *вертикальной гидродинамически совершенной скважины* (l=0): $\hat{a}_{\acute{y}} = R_{\hat{e}} \quad \grave{e} \quad \hat{a}_{\acute{y}} = r_c$, где r_c – радиус скважины по долоту.

Тогда интегралы (11) и (12) будут равны:

$$\int_{r_c}^{R_k}\frac{dF}{F}=\ln\frac{R_{\hat{e}}}{r_c}; \quad (21)$$

$$\int_{r_c}^{R_k}\frac{dF}{F^2}=\left(\frac{1}{r_c}-\frac{1}{R_{\hat{e}}}\right), \quad (22)$$

и функции геометрических размеров зоны дренирования пласта принимают вид:

$$f_a\left(r,\ h\right)=\frac{1}{2\pi h}\ln\frac{R_{\hat{e}}}{r_c}; \quad (23)$$

$$f_{\hat{a}}\left(r,\ h\right)=\frac{1}{4\pi^2 h^2}\left(\frac{1}{r_c}-\frac{1}{R_{\hat{e}}}\right), \quad (24)$$

что соответствует формулам (6) и (7).

Приведенные решения позволяют сопоставлять различные технологии повышения продуктивности скважин и предотвращения осложнений (например, пескопроявление, отложения смол, парафинов, солей и др.) на основе единой математической модели.

Литература

1. Васильев В. А., Сова Э. В., Щекин А. И. Нелинейная фильтрация газа к горизонтальной скважине / Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. Серия Нефть и газ, № 1(4). Ставрополь, 2004. С. 58–65.

2. Басниев К. С., Кочина Н. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. М.: Недра,1993. 415 с.

3. Каневская Р. Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. 212 с.