

ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ О ПРИТОКЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА К ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЕ ГРП И ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ СТВОЛУ ПО НЕЛИНЕЙНОМУ ЗАКОНУ ФИЛЬТРАЦИИ

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

Задача притока пластовых жидкостей к горизонтальным скважинам, дренам и трещинам рассматривалась многими авторами в различной постановке. Следует заметить, что все аналитические решения о притоке к горизонтальной скважине являются приближёнными. В отличие от вертикальных скважин проблема притока к горизонтальным стволам является более сложной в виду неоднородности характера линий тока в области дренирования. Рассматривается задача о притоке реального газа к вертикальной трещине ГРП и горизонтальному стволу в приближенной постановке в прямоугольном расчётном блоке. Получены соответствующие формулы для расчёта дебитов газа. В основу решения задачи принята двухзонная схема притока. Разработана методика определения дебита газа вертикальной трещины ГРП и горизонтального ствола, дренирующих прямоугольный расчётный блок с односторонним контуром питания. Приведены численные практические расчёты.

Ключевые слова: приток реального газа, вертикальная трещина ГРП, горизонтальный ствол, дебит газа, методика определения дебита.

APPROXIMATE SOLUTIONS OF THE REAL GAS INFLOW TO A VERTICAL HYDRAULIC FRACTURE AND HORIZONTAL WELLBORE ACCORDING TO THE NONLINEAR FILTRATION LAW

Kashirina K.O., 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

The task of the formation fluids inflow to the horizontal wells, drains and fractures has been observed by many authors from different points of view. It should be noted that all of the analytical solutions of the inflow to a horizontal well are approximate. Unlike the vertical wells, the problem of the inflow to the horizontal wellbores is more complicated due to the heterogeneity of the fluid flow lines in the drainage zone. There is considered the problem of real gas inflow to a vertical hydraulic fracture and horizontal wellbore, in the approximate formulation in rectangular rated box. The appropriate formulae are derived for the calculation of gas flow rates. There is adopted a two-zone scheme of the inflow as a basis of the task solution. Also, there is developed the technique of the vertical hydraulic fracture and horizontal wellbore gas flow rate determination, draining rectangular rated box with one-way external reservoir boundary. The numerical calculations are given.

Keywords: real gas inflow, vertical hydraulic fracture, horizontal wellbore, gas flow rate, gas flow rate technique.

На основании имеющихся теоретических исследований и накопленного практического опыта многие авторы выделяют следующие основные объекты, которые целесообразно разрабатывать горизонтальными стволами: маломощные пласты (5...10 м) с низкой проницаемостью с целью увеличения коэффициента продуктивности; нефтенасыщенные пласты с подошвенной водой и верхним газом с целью ограничения прорыва конусов воды и газа и увеличения коэффициента извлечения; трещиновато-пористые пласты с развитой вертикальной трещиноватостью; залежи высоковязких нефтей и битумов, шельфовые и труднодоступные продуктивные зоны; залежи, в которых

осуществляется поддержание пластового давления с целью создания эффективного линейного фронта вытеснения.

Одним из основных вопросов является обоснование рациональной геометрии области дренирования, т. е. оптимизация сетки размещения горизонтальных стволов. Кроме того, выбор протяжённости горизонтального ствола также требует реального обоснования, зависящего от применяемого оборудования при бурении, конструкции скважины, характеристики пласта и др.

Следует заметить, что все аналитические решения о притоке к горизонтальной скважине являются приближёнными. Одни авторы рассматривают горизонтальную скважину как линию стоков, другие, в лучшем варианте, как вертикальную трещину, высотой равной диаметру скважины. Что касается плотности расхода на единицу потока, то все аналитические решения построены в предположении одинаковой плотности (расхода на единицу длины горизонтального ствола).

В данной статье рассматривается задача о притоке реального газа к вертикальной трещине ГРП и горизонтальному стволу в приближенной постановке в прямоугольном расчётном блоке. Получены соответствующие формулы для расчёта дебитов газа.

В основу решения задачи принята двухзонная схема притока [1,2,3,4], суть которой состоит в том, что вся область дренирования разбивается на две зоны: внутреннюю (I), ограничивающуюся одной толщиной пласта h_o (рисунок 1), где имеет место пространственный приток, и внешнюю (II), где фильтрация плоскопараллельная.

Уравнение линии тока $h(x)$ для I зоны (рисунок 1) будем аппроксимировать функцией, которая называется «Локоном Аньези» [5]:

$$h^*(\bar{x}) = \frac{4\bar{h}^3}{\bar{x}^2 + 4\bar{h}^2}, \quad (1)$$

где

$$h^*(\bar{x}) = \frac{h(x)}{h_o}; \quad \bar{h} = \frac{b}{h_o}; \quad \bar{x} = \frac{x}{h}. \quad (2)$$

Для нелинейного закона фильтрации известно уравнение:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K}V + \frac{\rho}{m}V^2, \quad (3)$$

где

m – коэффициент макрошероховатости;

ρ – плотность газа в пластовых условиях;

$\mu = \mu(P)$ – вязкость газа в пластовых условиях;

V – скорость фильтрации;

K – проницаемость пласта по горизонтали.

Выражая скорость фильтрации через расход, приведённый к поверхностным условиям, отнесенный к длине трещины $2L$ или ствола скважины

$$V = \frac{Q}{2Lh(x)} = \frac{q_o}{h(x)} \quad (4)$$

и учитывая уравнение состояния реального газа, осредняя коэффициенты вязкости $\mu(\tilde{P})$ и $Z(\tilde{P})$,

$$\rho(\tilde{P}) = \frac{P}{P_{cm}} \frac{\rho_{cm} Z_{cm} T_{cm}}{Z(\tilde{P}) T_{nl}}, \quad (5)$$

из (3) получаем:

$$P_o - P_{mp} = a q_o \frac{dx}{h(x)} + b q_o^2 \frac{dx}{h^2(x)}, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{\mu(\tilde{P}) Z(\tilde{P}) P_{cm} T_{nl}}{2 \tilde{P} K Z_{cm} T_{cm}}; \quad (7)$$

$$b = \frac{\rho_{cm} P_{cm} T_{nl} Z(\tilde{P})}{2 M Z_{cm} T_{cm} \tilde{P}}; \quad (8)$$

$$\tilde{P} = 0,5(P_o + P_{mp}) \quad (9)$$

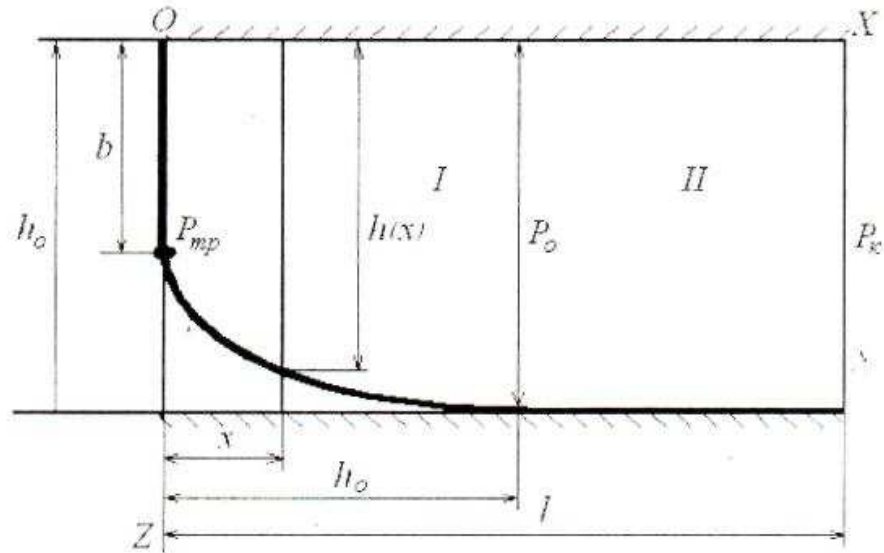


Рис.1. Схема притока к несовершенной галерее (вертикальной трещине)

Интегрируя уравнение (6) по давлению от P_{mp} до P_o и по x от ω до $x=h_o$ и внося выражение (1) и уравнение (6), после ряда преобразований получаем:

$$P_o - P_{mp} = Aq_o + Bq_o^2, \quad (10)$$

$$A = a(\ln h^* + C_1 + C_o); \quad (11)$$

$$h^* = \frac{h_o}{\omega}; \quad (12)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{h} - 1\right) \ln h^* + \frac{1}{8h^2}; \quad (13)$$

$$B = \frac{b}{\omega} (1 + C_2); \quad (14)$$

$$C_2 = \left(\frac{1}{h} - 1\right); \quad (15)$$

где

q_o – удельный дебит, приходящий на единицу длины трещины;

ω – половина ширины трещины.

Для притока реального газа в зоне II при $q(t)=q=const$ имеем:

$$P_{\kappa} - P_o = q_o \frac{l\mu(\tilde{P})}{h_o K} (1 - l^*); \quad l^* = \frac{h_o}{l}. \quad (16)$$

Решая совместно (10) и (16), получаем следующее квадратное уравнение относительно удельного дебита q_o вертикальной трещины

$$Bq_o^2 + \left[A + \frac{\mu(\tilde{P})l}{h_o K} (1 - l^*) \right] q_o - \Delta P_{mp} = 0, \quad (17)$$

решение которого есть:

$$q_{01,2} = -\frac{b}{2B} \pm \frac{1}{2B} \sqrt{b^2 - 4B\Delta P_{mp}}, \quad (18)$$

где

$$b = A + \frac{\mu(\tilde{P})l}{h_o K} (1 - l^*) \quad (19)$$

Пример.

Исходные параметры:

$P_{\kappa}=20\text{МПа}; P_{mp}=18\text{МПа};$

$\tilde{P}=19\text{МПа};$

$l=100\text{ м};$

$h_o=20\text{м};$

$\omega=0,005\text{м};$

$\mu=10^{-6}\text{м};$

$$P_{cm}=0,1013 \text{ МПа};$$

$$T_{nl}=309 \text{ К};$$

$$T_{cm}=293 \text{ К};$$

$$Z_{cm}=0,9;$$

$$Z(\tilde{P}) = 0,86;$$

$$K=0,285 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2;$$

$$\rho_{cm}=0,725 \text{ кг/м}^3;$$

$$\bar{h}=0,5; l^*=0,2;$$

$$\mu(\tilde{P})=0,0178 \cdot 10^{-3} \text{ Па};$$

$$C_o=4;$$

$$\Delta P_{mp} = P_{\kappa} - P_{mp} = 4 \cdot 10^6 \text{ МПа.}$$

1. По формулам (7) и (8) рассчитываем параметры a и b :

$$a = \frac{0,0178 \cdot 10^{-3} \cdot 0,86 \cdot 0,1013 \cdot 10^6 \cdot 309}{2 \cdot 19 \cdot 10^6 \cdot 0,285 \cdot 10^{-12} \cdot 293} = 1,678 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^2;$$

$$b = \frac{0,725 \cdot 0,1013 \cdot 10^6 \cdot 309 \cdot 0,86}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 \cdot 293 \cdot 19 \cdot 10^6} = 1,947 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^3,$$

2. По формулам (13) и (15) определяем фильтрационные сопротивления:

$$C_1 = \left(\frac{1}{0,5} - 1\right) \ln \frac{20}{0,005} + \frac{1}{8 \cdot (0,5)^2} = 8,794.$$

$$C_2 = \left(\frac{1}{0,5} - 1\right) = 1.$$

3. По формулам (11) и (14) рассчитываем A и B :

$$A = 1,678 \cdot 10^5 \left(\ln \frac{20}{0,005} + 8,794 + 4\right) = 3,539 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^2;$$

$$B = \frac{1,947 \cdot 10^6 \cdot 2}{0,005} = 7,788 \cdot 10^8 \text{ (Па} \cdot \text{с}^2) / \text{м}^4.$$

4. По формуле (19) рассчитываем

$$b = 3,539 \cdot 10^6 + \frac{0,0178 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{20 \cdot 0,285 \cdot 10^{-12}} (1 - 0,20) = 2,534 \cdot 10^8 \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

5. По формуле (18) определяем удельный расход

$$q_0 = -\frac{2,534 \cdot 10^8}{2 \cdot 7,788 \cdot 10^8} + \frac{1}{2 \cdot 7,788 \cdot 10^8} \sqrt{(2,534 \cdot 10^8)^2 + 4 \cdot 7,788 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^6} = 1,507 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с} =$$

$$= 1,507 \cdot 10^{-2} \cdot 0,864 \cdot 10^5 = 1,305 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{сут}$$

При длине вертикальной трещины $2L=400$ м дебит ее составит

$$Q = 1,305 \cdot 10^3 \cdot 400 \approx 522 \text{ тыс. м}^3 / \text{сут}$$

При двухстороннем контуре питания дебит удвоится.

К оценке дебита эквивалентного горизонтального ствола скважины можно подойти следующим путём. Если принять радиус горизонтального ствола $r_c=0,15$ м, то длина окружности составит

$$S = 2\pi r_c = 2\pi \cdot 0,15 = 0,942 \text{ м.}$$

В соответствии с конвергенцией линий тока вскрытую толщину пласта трещиной ГРП $h_o=10$ м причём за длину окружности «эквивалентной» окружности мнимой трубы $S_{эк}=10$ м. Тогда, исходя из обычной пропорции между длиной окружности, определяем дебит горизонтального ствола

$$Q_{zc} = \frac{0,942 \cdot 522 \cdot 10^3}{10} = 49,17 \text{ тыс. м}^3 / \text{сут}$$

Учитывая, что к горизонтальному стволу и нижней половине продуктивного пласта будет поступать такое же количество газа в сутки при вскрытии трещиной $\bar{h} = 0,5$, то дебит скважины удвоится и составит

$$Q_{zc} = 98,34 \text{ тыс. м}^3 / \text{сут},$$

т. е. в 5,3 раза меньше, чем дебит вертикальной трещины, что согласуется с ранее проведенными расчётами.

Выводы:

1. Разработана методика определения дебита газа вертикальной трещины ГРП и горизонтального ствола, дренирующих прямоугольный расчетный блок с односторонним контуром питания.
2. Приведены численные практические расчёты.

Список литературы

1. Каширина К.О. К обоснованию оптимальной сетки горизонтальных стволов скважин и вертикальных трещин ГРП в сравнение эффективности их работы. Сб науч. тр. «Новые технологии для Западной Сибири», вып. 2. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – с. 281-291.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (пер. с англ.). М.: «Наука». - 832 с.
3. Телков А.П. Подземная гидродинамика. Уфимский нефтяной университет, 1974.-224с.
4. Телков А.П., Грачёв С.И. Прикладные задачи разработки нефтегазоконденсатных месторождений и нефтегазодобычи. М: ЦентлитНефтегаз. – 2008.- 504с.

5. Телков А.П., Стклянин Ю.И. Образование конусов воды при добыче нефти и газа. М.: 1965.-164с.
6. Чарный И.А. Подземная гидромеханика. ГТТИ. – 1948.

Рецензенты:

Грачев С.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ТюмГНГУ, г. Тюмень;

Сохошко С.К., д.т.н., профессор, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ТюмГНГУ, г. Тюмень.