СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин О.С. Химия на своем месте // Химия и жизнь. – 2003. – №5. – С. 26-29.

2. Сироткин О.С. Система химических соединений // Вестник Казанского технологического университета. – 2000. – №1-2. – С. 190-198.

3. Сироткин О.С. Уровни строения вещества // Вестник Казанского технологического университета. – 1998. – №2. – С. 6-15.

4. Сироткин О.С. Начала единой химии (Унитарность как основа формирования индивидуальности, раскрытия уникальности и фундаментальности химической науки). – Казань: Изд. АН РТ «Фэн», 2003. – 252 с.

5. Сироткин О.С. Парадигма многоуровневой организации вещества как фундаментальная основа современной концепции естествознания // Успехи современного естествознания. – 2003. – № 11. – С. 87.

6. Сироткин О.С. Система мироздания как фундаментальная основа современной материалистической концепции естествознания. Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – № 7. – С. 141-143.

7. Сироткин О.С., Диброва М.П., Загайнова Х.Р. Классификация естественных наук на основе единой материалистической системы Мироздания. Материалы докладов международной конференции «Энергетика 2008». – Казань, КГЭУ, 2008. – С. 38-42.

Технические науки

УДК 622.276:532.5

РАСЧЕТ ДЕБИТА ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Гасумов Р.А., Ахмедов К.С., Толпаев В.А.

ОАО «СевКавНИПИгаз», г. Ставрополь, Россия

Технологическая операция вертикального гидроразрыва пласта (ГРП) часто применяется на газодобывающих промыслах для интенсификации притока флюида к скважине. Широкое практическое применение ГРП стимулирует научные и промысловые исследования по изучению закономерностей фильтрации газа к скважинам с трещинами гидроразрыва [1–4]. В предлагаемой статье выводится новая формула для расчета дебита газодобывающей скважины после ГРП, расчеты по которой осуществляются намного проще, нежели по формулам [2, 3]. В то же время предлагаемая авторами альтернативная формула дает результаты, отклоняющиеся от результатов [2, 3] в пределах не более 3-5%, что позволяет рекомендовать альтернативную формулу к практическому применению.

1. Геометрическая модель призабойной зоны и трещины гидроразрыва

Следуя работе Каневской Р.Д. и Каца Р.М. [3] вертикальную трещину гидроразрыва пласта с конечной толщиной и проводимостью моделируем в виде эллипса с полуосями l и w (рис. 1).

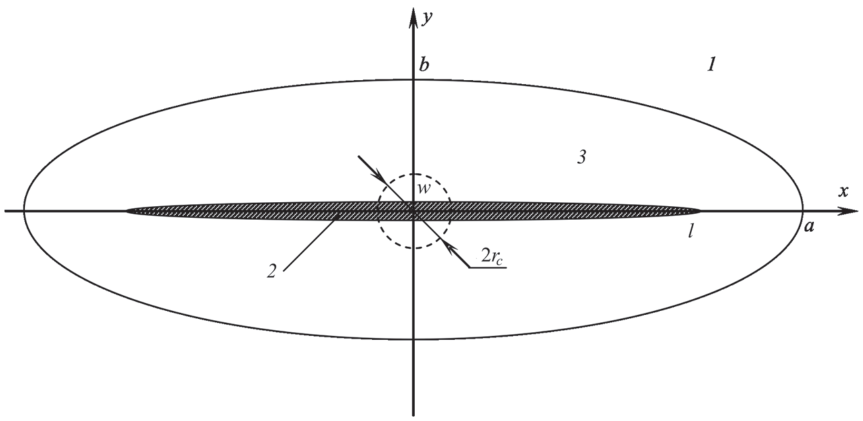

Рис. 1. Схема области фильтрации:
1 – пласт; 2 – трещина; 3 – призабойная зона пласта.
$a^2 - b^2 = l^2 - w^2 = f^2$; f – фокусное расстояние конфокальных эллипсов;
r_c – радиус скважины. Приток флюида в скважину осуществляется только через трещину

Границу призабойной зоны пласта (ПЗП) моделируем эллипсом, конфокальным к эллиптической трещине. Геометрические размеры и фокусное расстояние f этих двух конфокальных эллипсов будут связаны уравнением

$$a^2 - b^2 = l^2 - w^2 = f^2. \qquad (1)$$

Проницаемости наполнителя трещины 2, призабойной зоны пласта 3 и незагрязненной (удаленной от скважины) части пласта ℓ будем обозначать соответственно как k_2, k_3 и k_1. Установившуюся фильтрацию флюида во всей области фильтрации на рис. 1, как и в [3], считаем подчиняющейся линейному закону Дарси. Вдоль эллиптических границ трещины и ПЗП давление принимается постоянным – названные границы при выводе формулы для дебита скважины принимаются за изобары.

Для вывода формулы дебита скважины с трещиной ГРП предварительно рассчитаем фильтрационные потоки в каждой отдельной части области фильтрации на рис. 1.

2. Расчет притока флюида в скважину через вертикальную трещину гидроразрыва

При расчете притока флюида в скважину из вертикальной эллиптической трещины в [3] в начале координат размещают точечный сток, мощность которого и определяет искомый дебит скважины с ГРП. Однако радиус скважины ≈ 10–15 см, а наибольшая толщина (раскрытие) трещины ≈ 1 см. При таком соотношении размеров радиуса скважины и толщины трещины, моделировать течение к скважине из трещины гидроразрыва при помощи точечного стока в начале координат проблематично, что, по-видимому, и привело авторов [3] к сложному расчетному алгоритму.

Чтобы избежать вычислительных трудностей, связанных с использованием точечного стока, в данной работе на этапе расчета притока флюида в скважину из трещины гидроразрыва последняя моделируется в виде двух одинаковых тонких протяженных прямоугольников с размерами ℓ' (длина) и $2w'$ (ширина). Прямоугольники непосредственно примыкают к скважине по разные стороны от нее и их оси расположены на одной прямой, проходящей через центр скважины. Эллиптическая трещина отождествляется с прямоугольной, если вне кругового контура скважины они обладают равными длинами и площадями поперечных сечений. Исходя из такого определения тождественности двух форм трещин, для геометрических параметров трещин получаем следующие уравнения связи:

$$\ell' = \ell - r_c \quad \text{и} \quad w' = \frac{\pi \cdot \ell - 4 \cdot r_c}{4 \cdot \left(\ell - r_c\right)} \cdot w. \qquad (2)$$

Рассмотрим приток флюида к скважине через трещину гидроразрыва прямоугольной формы. Установившаяся плоскопараллельная фильтрация совершенного газа, как известно, описывается решениями уравнения Лапласа

$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \qquad (3)$$

относительно функции $\Phi = \dfrac{p^2}{2}$, где p – давление. Если решение уравнения (3) при соответствующих граничных условиях будет найдено, то поле скоростей найдется из закона Дарси по формуле

$$\vec{v} = -\frac{k_2}{\mu} \cdot \operatorname{grad} p. \qquad (4)$$

В решаемой задаче расчетная область – прямоугольник $G = \left\{0 \le x \le \ell';\, 0 \le y \le w'\right\}$, на сторонах которого задаются следующие граничные условия:

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_{y=0} = 0, \qquad \Phi\big|_{y=w'} = \Phi_{\text{трщ}} = \frac{p_{\text{трщ}}^2}{2} \qquad (5)$$

$$\Phi\big|_{x=\ell'} = \Phi_{\text{трщ}} = \frac{p_{\text{трщ}}^2}{2}, \qquad \left.\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right|_{x=0} = -\frac{p_{\text{заб}} \cdot \mu \cdot v}{k_2} = \text{const}. \qquad (6)$$

Решение краевой задачи (3)–(6) строится стандартным методом Фурье и имеет вид

$$\Phi(x,y)=\Phi_{\text{трщ}}+\sum_{n=0}^{\infty}A_n\cdot\frac{\operatorname{sh}\left[\lambda_n\cdot(\ell'-x)\right]}{\operatorname{sh}(\lambda_n\cdot\ell')}\cdot\cos(\lambda_n\cdot y), \tag{7}$$

где $$\lambda_n=\frac{\pi\cdot(2n+1)}{2w'}. \tag{8}$$

Неопределенные коэффициенты A_n в формуле (7) находим из последнего граничного условия (6). С помощью известных формул для коэффициентов ряда Фурье, получим, что

$$A_n=(-1)^n\cdot\frac{8\cdot p_{\text{заб}}\cdot\mu\cdot v\cdot w'}{\pi^2\cdot(2n+1)^2\cdot k_2\cdot\operatorname{cth}(\lambda_n\cdot\ell')} \tag{9}$$

Подстановка коэффициентов A_n из формул (9) в (7) приводит к следующему выражению для функции $\Phi=\frac{p^2}{2}$:

$$\Phi(x,y)=\Phi_{\text{трщ}}+\frac{8\cdot p_{\text{заб}}\cdot\mu\cdot v\cdot w'}{\pi^2\cdot k_2}\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\ \frac{\operatorname{sh}\ \lambda_n\cdot(\ell'-x)\ \cdot\cos(\lambda_n\cdot y)}{(2n+1)^2\ \operatorname{ch}(\lambda_n\cdot\ell')}. \tag{10}$$

В формуле (10) осталась лишь одна неизвестная величина – скорость фильтрации на границе $x = 0$ – на входе потока из трещины гидроразрыва в ствол скважины. Для определения неизвестной величины v вычислим среднее значение функции $\Phi(x, y)$ на границе $x = 0$. На основании формулы (10) для среднего значения

$$\langle\Phi\rangle=\frac{1}{w'}\cdot\int_0^{w'}\Phi(0,y)\,dy \tag{11}$$

найдем, что

$$\langle\Phi\rangle=\Phi_{\text{трщ}}+\frac{16\cdot p_{\text{заб}}\cdot\mu\cdot v\cdot w'}{\pi^3\cdot k_2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\operatorname{th}(\lambda_n\cdot\ell')}{(2n+1)^3}. \tag{12}$$

С другой стороны, на границе $x = 0$ давление должно быть равно забойному давлению и, следовательно, должно выполняться равенство $\langle\Phi\rangle=\frac{p_{\text{заб}}^2}{2}$. С учетом последнего замечания из (12) для неизвестной величины получим следующее значение:

$$v=\frac{\pi^3\cdot k_2\ \left(p_{\text{заб}}^2-p_{\text{трщ}}^2\right)}{32\cdot p_{\text{заб}}\cdot\mu\cdot w'\cdot S}, \tag{13}$$

где $$S=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\operatorname{th}(\lambda_n\cdot\ell')}{(2n+1)^3}.$$

Учитывая, что приток флюида в скважину (подсчитанный для атмосферного давления и пластовой температуры) через трещину гидроразрыва в пласте с толщиной b' равен величине $Q = 4 \cdot v \cdot w' \cdot b' \cdot \dfrac{p_{\text{заб}}}{p_{\text{атм}}}$, для искомой величины дебита Q скважины окончательно получим выражение

$$Q = \frac{\pi^3 \cdot k_2 \cdot b' \cdot \left(p_{\text{заб}}^2 - p_{\text{трщ}}^2\right)}{8 \cdot p_{\text{атм}} \cdot \mu \cdot S}. \tag{14}$$

3. Расчет притока флюида к вертикальной эллиптической трещине гидроразрыва от конфокальной границы ПЗП

Рассмотрим теперь фильтрацию в области 3 между трещиной гидроразрыва и эллиптической границей призабойной зоны. На этом этапе исследования форму трещины примем в виде удлиненного эллипса с осями $2l$ (длина трещины) и $2w$ (параметр, характеризующий раскрытие трещины). Формула для притока совершенного газа от эллиптической границы ПЗП к эллиптической границе трещины хорошо известна [5] и имеет вид:

$$Q = \frac{\pi \cdot b' \cdot k_3}{\mu \cdot P_{\text{атм}}} \cdot \frac{P_{\text{ПЗП}}^2 - P_{\text{трщ}}^2}{\ln\left(\dfrac{a+b}{\ell + w}\right)}. \tag{15}$$

4. Расчет притока флюида к эллиптической границе ПЗП от кругового контура питания

Теперь рассмотрим фильтрацию в 1-й области между эллиптической границей призабойной зоны и круговым контуром питания с радиусом R. Формулу для притока флюида к эллиптической границе ПЗП можно получить методом ЭГДА, исходя из формулы (4)-(25) справочника [6] по расчету электрических емкостей. Формула (4)-(25) в терминах рассматриваемой задачи фильтрации на основании ЭГДА запишется следующим образом:

$$Q = \frac{2 \cdot b' \cdot k_1 \cdot \left(P_{\text{П}}^2 - P_{\text{ПЗП}}^2\right)}{\mu \cdot P_{\text{атм}}} \cdot \frac{K(k')}{K(k) - F(\psi; k)}, \tag{16}$$

где $K(k)$ и $K(k') = K'(k)$ – полные эллиптические интегралы 1-го рода с модулями k и $k' = \sqrt{1-k^2}$ соответственно, а $F(\psi;\ k)$ – неполный эллиптический интеграл первого рода. Модуль k и аргумент ψ вычисляются через параметры уравнений границ ПЗП и радиус R кругового контура питания по следующим формулам:

$$k = \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2} \cdot \frac{R^2 + b^2}{R^2 - b^2}; \qquad \psi = \arcsin\left(\frac{b}{a} \cdot \frac{R^2 + a^2}{R^2 + b^2}\right). \tag{17}$$

5. Вывод формулы для расчета дебита газодобывающей скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта

Формулы (14), (15) и (16) дают систему трех линейных уравнений с тремя неизвестными – дебитом Q и давлениями $P_{\text{трщ}}$ и $P_{\text{ПЗП}}$. Решая методом исключения эту систему уравнений, для расчета дебита скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва в ПЗП получим следующую формулу:

$$Q = \frac{b' \cdot \left(P_{\text{П}}^2 - P_{\text{заб}}^2\right)}{\mu \cdot P_{\text{атм}}} \cdot \frac{1}{\dfrac{1}{2 \cdot k_1} \cdot \dfrac{K(k) - F(\psi;k)}{K(k')} + \dfrac{1}{\pi \cdot k_3} \ln\left(\dfrac{a+b}{\ell + w}\right) + \dfrac{8 \cdot S}{\pi^3 \cdot k_2}}. \tag{18}$$

Составляя отношение дебита скважины после ГРП к дебиту этой же скважины без ГРП, для коэффициента эффективности ГРП получаем следующее выражение:

$$\phi = \frac{Q(\text{после ГРП})}{Q(\text{без ГРП})} = \frac{\ln\left(\frac{R}{r_c}\right)}{\frac{\pi}{2}\cdot\frac{K(k)-F(\psi;k)}{K(k')}+\frac{k_1}{k_3}\cdot\ln\left(\frac{a+b}{\ell+w}\right)+\frac{k_1}{k_2}\cdot\frac{8\cdot S}{\pi^2}}. \quad (19)$$

Сопоставительные расчеты дебитов скважин с ГРП по формулам (18) и [2, 3] выявили, что максимальные относительные расхождения не превышают 3-5%. В то же время в вычислительном плане формула (18) для практики предпочтительнее, так как она имеет более простую программную реализацию.

На практике формулы (18) и (19) позволяют рассчитать прогнозный дебит скважины, на которой планируется проведение операции гидроразрыва пласта, и, в конечном итоге, оценить ожидаемую технико-экономическую эффективность от проведения ГРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология проектирования гидроразрыва пласта как элемента системы разработки газоконденсатных месторождений / О.П. Андреев [и др.]. – М.: ООО «Газпром экспо», 2009. – 183 с.

2. Кадет В.В., Селяков В.И. Фильтрация флюида в среде, содержащей эллиптическую трещину гидроразрыва // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1988. – № 5. – С. 54-60.

3. Каневская Р.Д., Кац Р.М. Аналитические решения задач о притоке жидкости к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва и их использование в численных моделях фильтрации // Изв. РАН. МЖГ. – 1996. – № 6. – С. 59-80.

4. Производительность скважин. Руководство Хеманта Мукерджи. – М.: 2001.

5. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 480 с.

6. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.

РАЗВИТИЕ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЯМР)

Кашаев Р.С.

ГОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет, Российская Федерация, Республика Татарстан (420107, г. Казань, ул. Красносельская, 51) kashaev2007@yandex.ru

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, междисциплинарный, образовательный

SCIENCE AND EDUCATION DEVELOPMENT ON THE BASE OF INTERDICIPLINARY APPROACH TO USE OF FUNDAMENTAL AND UNIVERSAL METHOD OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE (NMR)

Kashaev R.S.-H.

Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan (420107, Kazan, Krasnoselskaya str, 51) kashaev2007@yandex.ru

Key words: nuclear magnetic resonance, interdisciplinary, educational

Возможно, данные тезисы покажутся кому-то спорными, но я хочу защитить положение о том, что в силу фундаментальности явления и универсальных возможностей ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для анализа вещества, дан-