

Оценка эффективности гидроразрыва пласта с двумя трещинами в окрестности одиночной скважины

Ю.И. Яхина

ООО «Термосим», Казань, Россия

E-mail: vib-210@mail.ru

Построено и исследовано решение задачи о фильтрации жидкости в неограниченном однородном пласте, вскрываемом одиночной скважиной с двумя пересекающимися трещинами с учетом их гидродинамического сопротивления. Общее интегральное представление возмущенного поля давления получено с применением функции влияния мгновенного точечного источника. Как частный случай рассмотрен квазистационарный режим работы скважины. Дана оценка точности и границ применимости полученных асимптотических решений. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Определены продуктивность скважины и псевдоскин-фактор системы трещин, построены явные аналитические выражения для этих характеристик. В ходе вычислительных экспериментов исследовано взаимодействие пересекающихся трещин при различных углах раскрытия. Получена оценка эффективности повторного гидравлического разрыва продуктивного пласта. Показано, что максимальный расход достигается при перпендикулярном расположении трещин, а распределение оттока (притока) вдоль плоской вертикальной трещины существенно зависит от её относительного фильтрационного сопротивления.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, азимут трещины повторного гидравлического разрыва, эффективность повторного гидравлического разрыва, квазистационарный режим работы скважины, псевдоскин-фактор повторного гидравлического разрыва, фильтрационное сопротивление в трещинах, функция влияния мгновенного точечного источника, гидродинамика трещины

Для цитирования: Яхина Ю.И. (2018). Оценка эффективности гидроразрыва пласта с двумя трещинами в окрестности одиночной скважины. *Георесурсы*, 20(2), с. 108-114. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.2.108-114>

Введение

С целью вовлечения в разработку недренлируемых и слабодренлируемых запасов полезных ископаемых применяется гидравлический разрыв пласта (ГРП). Данная технология способствует созданию высокопроводимой трещины, что позволяет увеличить продуктивность добывающих или приёмистость нагнетательных скважин. По экспертным оценкам гидродинамических исследований (ГИС) гидравлический разрыв продуктивного пласта является наиболее результативным геолого-техническим мероприятием, гарантирующим повышение эффективности разработки плохо проницаемых пластов. Одно из первых исследований стационарного однофазного притока к скважине с одиночной трещиной ГРП представлено в работе (Prats, 1961). Теоретические расчеты показывают, что ГРП позволяет в несколько раз увеличить дебит скважин за счет вовлечения в эксплуатацию слабодренлируемых зон, причем объем добычи или закачки зависит от проводимости и длины трещины (Cinco-Ley et al., 1978; Meehan et al., 1989).

Обзор ряда других публикаций и анализ эффективности ГРП в скважине с одной вертикальной трещиной в круговом контуре питания выполнен в работе (Морозов, 2016) на основе различных оценок продуктивности и обобщенного понятия псевдоскин-фактора (Economides et al., 2002).

При существенном снижении темпов добываемой продукции относительно первоначальных режимов проводят

повторный ГРП. При этом для обеспечения полного охвата коллектора и введения в разработку новых запасов применяют метод переориентации азимута, который позволяет реализовать развитие трещины в направлении, отличном от первого гидроразрыва пласта.

Повторный гидравлический разрыв пласта является одним из наиболее распространенных методов интенсификации добычи запасов полезных ископаемых и повышения продуктивности пласта, что делает актуальной задачу анализа и прогноза его эффективности. В частном случае, задача о стационарном притоке к скважине с несколькими вертикальными трещинами гидроразрыва при равномерно распределенном притоке вдоль трещин в области, ограниченной круговым контуром питания, рассматривалась в работе (Raghavan, Joshi, 1993). Аналогичная задача о стационарном равномерно распределенном притоке к двум трещинам с различными геометрическими характеристиками при заданном угле пересечения решалась численно в (Лихтарев, Пестриков, 2010).

В рамках данного исследования рассматриваются теоретические вопросы, связанные с анализом нестационарного гидродинамического режима одной и двух пересекающихся трещин различного азимута с учетом их гидравлического сопротивления в неограниченном однородном пласте. Выполнена оценка эффективности повторного ГРП при различных углах раскрытия. Получены явные аналитические выражения для продуктивности скважины и псевдоскин-фактора.

Общее интегральное представление возмущения поля пластового давления

В период эксплуатации скважины движение жидкости в призабойной зоне происходит за счет потенциальной энергии упругого состояния коллектора, в результате снижения давления на забое скважины. При этом объём жидкости увеличивается, а пористость и, возможно, проницаемость уменьшаются за счет расширения скелета пласта. В случае нагнетания жидкости в пласте поток закачиваемого флюида поддерживается за счет повышенного давления на забое, и процесс фильтрации развивается в обратном направлении.

Основной характеристикой фильтрационных процессов является поле пластового давления, которое в случае неустановившейся упругой фильтрации в пористой среде с распределенными источниками описывается уравнением пьезопроводности (Чарный, 1963):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \kappa \Delta P + \frac{q^*}{m_0 \beta}; \quad |x|, |y|, |z| < \infty, t > 0,$$

где $\kappa = k/(\mu \beta m_0)$ – коэффициент пьезопроводности, определяющий скорость распространения возмущений давления $P(x, y, z, t)$ в пористой среде с проницаемостью k , пористостью m_0 , коэффициентом упругоэластичности β , вязкостью жидкости μ ; $q^*(x, y, z, t)$ – плотность распределенных источников, которая представляет собой количество жидкости, поступающей в единицу объема среды за единицу времени t ; Δ – дифференциальный оператор Лапласа в системе декартовых координат (x, y, z) .

Пусть в начальный момент времени возмущение давления в пласте отсутствует, тогда решение уравнения пьезопроводности при нулевых начальных условиях можно записать в общей интегральной форме с помощью метода мгновенных точечных источников (Карслоу, Егер, 1964; Тихонов, Самарский, 1999):

$$P(x, y, z, t) = \int_0^t \iiint_{-\infty}^{+\infty} \frac{q^*(\xi, \eta, \zeta, \tau)}{m_0 \beta} G^*(\xi, \eta, \zeta, x, y, z, t - \tau) d\xi d\eta d\zeta d\tau, \quad (1)$$

где $G^*(\xi, \eta, \zeta, x, y, z, t - \tau)$ – функция влияния мгновенного точечного источника, которая представляет собой возмущение давления в точке (x, y, z) в момент времени t , вызванное единичным мгновенным точечным источником в точке (ξ, η, ζ) в момент времени $t - \tau$:

$$G^*(\xi, \eta, \zeta, x, y, z, t - \tau) = \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi \kappa (t - \tau)}} \right)^3 e^{-\frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}{4\kappa(t - \tau)}}.$$

Общий (суммарный) приток или отток жидкости Q в скважине с трещинами за единицу времени по определению равен:

$$Q(t) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} q^*(\xi, \eta, \zeta, t) d\xi d\eta d\zeta.$$

Воспользуемся полученным представлением (1) для исследования процесса фильтрации при нагнетании жидкости в однородном изотропном пласте толщиной h в окрестности нагнетательной скважины с двумя плоскими вертикальными трещинами, созданными в результате гидроразрыва и пересекающимися под углом α (Рис. 1).

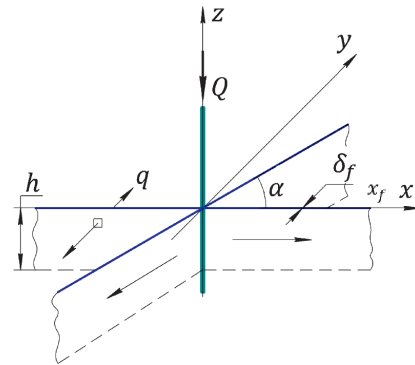


Рис. 1. Нагнетательная скважина с пересекающимися плоскими трещинами

С целью упрощения дальнейших рассуждений предположим, что трещины протяженностью $2x_f$ и шириной δ_f расположены симметрично относительно оси скважины, имеют одинаковую геометрию и идентичные гидродинамические свойства. Расход жидкости $Q(t)$, закачиваемый в скважину, распределен равномерно по мощности пласта (по высоте трещин) с поверхностной плотностью $q(x, t)$. Здесь под q понимается количество жидкости, закачиваемой в единицу мощности пласта с единицы длины трещины за единицу времени. При этом плотность распределенного источника вдоль трещины с учетом малости раскрытия разрыва δ_f определяется соотношением: $q^*(x, y, z, t) \approx q(x, t) / \delta_f$ (при $q^* = 0$ вне трещины, $|y| > \delta_f / 2$).

В силу линейности рассматриваемой задачи и идентичности трещин создаваемое ими возмущение поля давления можно рассматривать как сумму возмущений, вызванных одиночными трещинами, одна из которых расположена, как показано на рисунке 1, вдоль оси x , а другая, повторная трещина, направлена вдоль оси с координатами:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

При допущении об однородности пласта и равномерности нагнетания по вертикали, общее интегральное представление поля давления (1) после интегрирования по η преобразуется к виду:

$$P(x, y, t) = \frac{\mu}{4\pi k} \int_0^t \int_{-x_f}^{x_f} \frac{q(\xi, \tau)}{(t - \tau)} \left[e^{-\frac{(x - \xi)^2 + y^2}{4\kappa(t - \tau)}} + e^{-\frac{(x' - \xi)^2 + y'^2}{4\kappa(t - \tau)}} \right] d\xi d\tau. \quad (2)$$

Суммарный расход жидкости Q примет вид:

$$Q(t) = 2h \int_{-x_f}^{x_f} q(x, t) dx.$$

Гидродинамика одиночной трещины

Гидроразрыв продуктивного пласта позволяет создать трещину с высокой проницаемостью $k_f \gg k$, что приводит к снижению гидравлического сопротивления призабойной зоны и, как следствие, к увеличению фильтрационной поверхности. По этой же причине, переходные процессы перераспределения давления в трещине P_f происходят очень быстро, и течение жидкости в каждый момент времени можно описать стационарным уравнением фильтрации (Meehan et al., 1989):

$$\frac{k_f \delta_f}{\mu} \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2} = q; \quad 0 < x < x_f, \quad t > 0. \quad (3)$$

По предположению однородная трещина состоит из двух разнонаправленных симметричных относительно скважины «крыльев», что позволяет рассматривать область фильтрации жидкости только в одном направлении разрыва (например, в интервале $0 < x < x_f$), как показано на рисунке 2.

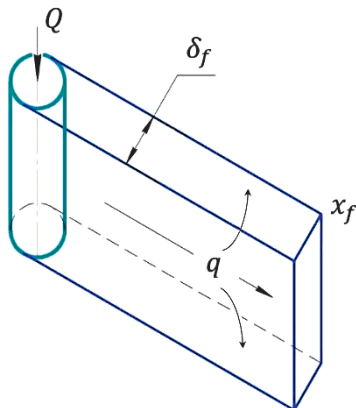


Рис. 2. Геометрическая модель крыла трещины

На забое скважины задано возмущение давления жидкости P_w относительно пластового, а приток с торца считается пренебрежимо малым. Таким образом, уравнение (3) дополняется краевыми условиями:

$$P_f(x, t)|_{x=0} = P_w, \quad \left. \frac{\partial P_f}{\partial x} \right|_{x=x_f} = 0.$$

Решение сформулированной выше задачи, описывающий процесс фильтрации в трещине, может быть представлено в виде:

$$P_f(x, t) = P_w - \frac{\mu}{k_f \delta_f} \left[\int_0^x \xi q(\xi, t) d\xi + x \int_x^{x_f} q(\xi, t) d\xi \right], \quad 0 < x < x_f. \quad (4)$$

Соотношение (4) связывает распределение давления вдоль трещины с плотностью расхода жидкости $q(x, t)$, и должно рассматриваться совместно с уравнением (2) при $y = 0$:

$$P_f(x, t) = \frac{\mu}{4\pi k} \int_0^t \int_{-x_f}^{x_f} \frac{q(\xi, \tau)}{(t-\tau)} \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa(t-\tau)}} + e^{-\frac{(x'+\xi)^2 + y'^2}{4\kappa(t-\tau)}} \right] d\xi d\tau, \quad (5)$$

где $0 < x < x_f, \quad t > 0, \quad x' = x \cos \alpha$ и $y' = x \sin \alpha$.

Для определения распределенного притока вдоль трещины, объединяя уравнения (4) и (5), получим интегральное уравнение:

$$P_w = \frac{\mu}{4\pi k} \int_0^t \int_{-x_f}^{x_f} \frac{q(\xi, \tau)}{(t-\tau)} \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa(t-\tau)}} + e^{-\frac{(x'+\xi)^2 + y'^2}{4\kappa(t-\tau)}} \right] d\xi d\tau + \frac{\mu}{k_f \delta_f} \left[\int_0^x \xi q(\xi, t) d\xi + x \int_x^{x_f} q(\xi, t) d\xi \right], \quad (6)$$

где $0 < x < x_f$ и $t > 0$.

Квазистационарный режим скважины с пересекающимися трещинами

Как показывают предварительные оценки при неизменных условиях эксплуатации скважины (постоянное давление на забое P_w или постоянный расход Q) квазистационарный режим фильтрации в пласте, характеризующийся неизменным во времени профилем относительного распределения притока вдоль трещины $\bar{q}(x) = q(x, t)/\langle q \rangle$, где $\langle q \rangle = Q(t)/(4hx_f)$, устанавливается при $\kappa t/x_f^2 \geq 100$.

При этом интегральное уравнение (6) принимает вид:

$$P_w = -\frac{\mu Q(t)}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{4\pi k} \int_0^{x_f} \bar{q}(\xi) \left[Ei\left(-\frac{(x+\xi)^2}{4\kappa t}\right) + Ei\left(-\frac{(x'-\xi)^2 + y'^2}{4\kappa t}\right) + Ei\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa t}\right) + Ei\left(-\frac{(x'-\xi)^2 + y'^2}{4\kappa t}\right) \right] d\xi + \frac{1}{k_f \delta_f} \int_0^x \xi \bar{q}(\xi) d\xi + x \int_x^{x_f} \bar{q}(\xi) d\xi \right\}. \quad (7)$$

Здесь $Ei(-x) = -\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ – интегральная показательная функция, для малых значений аргумента (Абрамовиц, Стиган, 1979):

$$Ei(-x) \approx \ln(1.781x).$$

Соответственно в квазистационарном приближении вместо выражения (7) для больших значений времени t будем иметь:

$$P_w = -\frac{\mu Q(t)}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{4\pi k} \int_0^{x_f} \bar{q}(\xi) \left[\ln\left(\frac{(x+\xi)^2}{2.2458 \kappa t}\right) + \ln\left(\frac{(x-\xi)^2}{2.2458 \kappa t}\right) + \ln\left(\frac{(x'+\xi)^2 + y'^2}{2.2458 \kappa t}\right) + \ln\left(\frac{(x'-\xi)^2 + y'^2}{2.2458 \kappa t}\right) \right] d\xi + \frac{1}{k_f \delta_f} \int_0^x \xi \bar{q}(\xi) d\xi + x \int_x^{x_f} \bar{q}(\xi) d\xi \right\}, \quad (8)$$

где $x' = x \cos \alpha$ и $y' = x \sin \alpha$.

Численное решение задачи о распределенном расходе жидкости вдоль трещины при наличии фильтрационного сопротивления

Здесь и в дальнейшем в расчетах принимаются следующие типичные для промысловых условий нагнетания жидкости (воды) значения параметров: давление на забое – $P_w = 4.053 \cdot 10^6$ Па (40 атм), полудлина трещины – $x_f = 100$ м, ширина трещины – $\delta_f = 0.2$ м, коэффициент пьезопроводности – $\kappa = 2.78$ м²/с (10^4 м²/час),

проницаемость пласта – $k = 10^{-13}$ м² (100 мД), вязкость флюида – $\mu = 0.001$ Па·с (1 спз), время эксплуатации скважины – $t = 360000$ с (100 часов).

Результаты вычислительных экспериментов, представленные на рисунке 3а, показали, что распределение притока вдоль трещины существенно зависит от ее относительного фильтрационного сопротивления $kx_f/(k_f\delta_f)$. На конце трещины наблюдается резкое увеличение оттока, что связано с изменением характера течения жидкости с линейного на квазирадиальный.

В свою очередь, при известной плотности закачки $q(x,t)$, учитывающей фильтрационное сопротивление в трещинах, квазистационарное распределение давления в пласте может быть рассчитано на основе асимптотического представления общего уравнения (2):

$$P(x, y, t) = - \int_0^{x_f} \frac{\mu q(\xi, t)}{4\pi k} \left[Ei \left(- \frac{(x + \xi)^2 + y^2}{4\mu t} \right) + Ei \left(- \frac{(x - \xi)^2 + y^2}{4\mu t} \right) + Ei \left(- \frac{(x' + \xi)^2 + y'^2}{4\mu t} \right) + Ei \left(- \frac{(x' - \xi)^2 + y'^2}{4\mu t} \right) \right] d\xi,$$

где $x' = x \cos\alpha - y \sin\alpha$ и $y' = x \sin\alpha + y \cos\alpha$.

Сравнительный анализ (Рис. 4) показывает, что перепад давления вдоль трещин существенно возрастает с ростом их фильтрационного сопротивления.

Рассмотрим распределение притока в пласт при равномерном распределении давления вдоль трещин $P_f = P_w$, при отсутствии фильтрационного сопротивления ($k_f \rightarrow \infty$). Анализ решения обратной задачи о распределении оттока при заданном давлении показывает, что при увеличении угла раскрытия между трещинами градиенты давления в околоскважинной зоне пласта снижаются и уменьшается локальный отток жидкости, как представлено на рисунке 5. А на удаленной концевой части трещины наблюдается обратный эффект – плотность потока возрастает по причине снижения взаимовлияния между трещинами.

При стремлении угла раскрытия к 0° давление в околоскважинной зоне выравнивается, и соответственно понижается плотность закачки: две трещины начинают работать как одна, и отток из центральной части увеличивается.

Продуктивность скважины и псевдоскин-фактор

Обобщая традиционное понятие скин-фактора (Economides et al., 2002; Морозов, 2016), определим псевдоскин-фактор скважины с пересекающимися трещинами

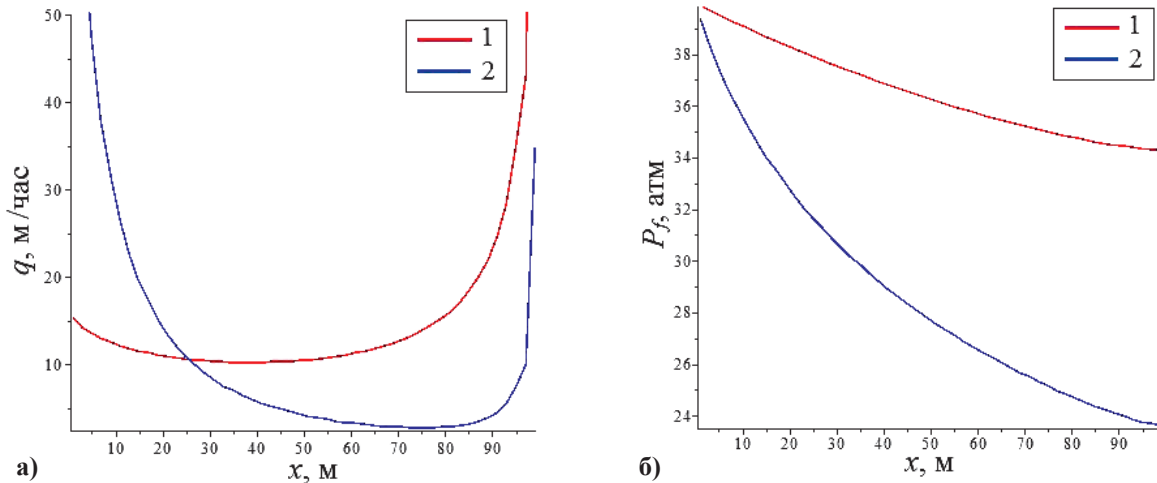


Рис. 3. Распределение притока в трещине (а) и давления вдоль трещины (б) в окрестности скважины при взаимно перпендикулярном расположении трещин и различных проницаемостях: 1 – $k_f = 5 \cdot 10^4$ мД и 2 – $k_f = 10^4$ мД

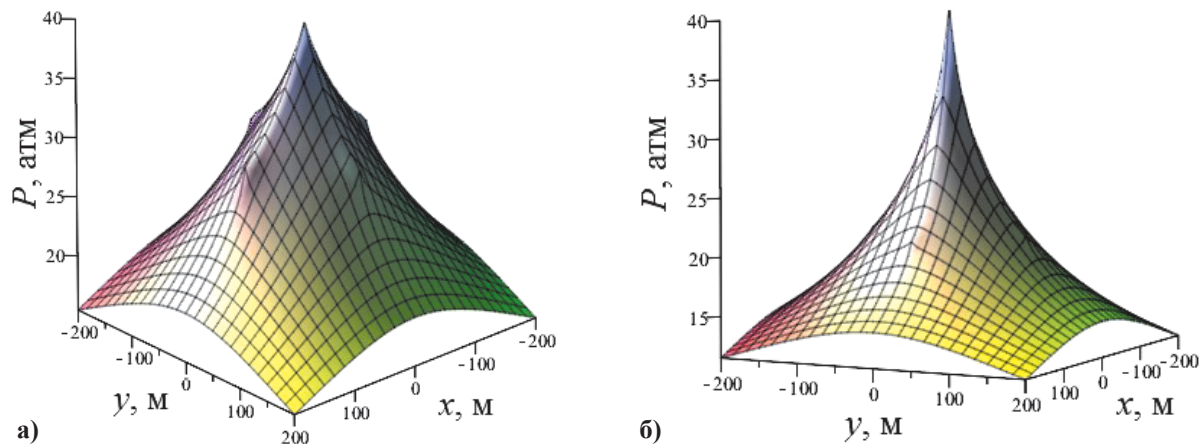


Рис. 4. Возмущение пластового давления в окрестности скважины при взаимно перпендикулярном расположении трещин с проницаемостью: (а) – $k_f = 5 \cdot 10^4$ мД ($kx_f/(k_f\delta_f) \sim 1$) и (б) – $k_f = 10^4$ мД ($kx_f/(k_f\delta_f) \sim 5$)

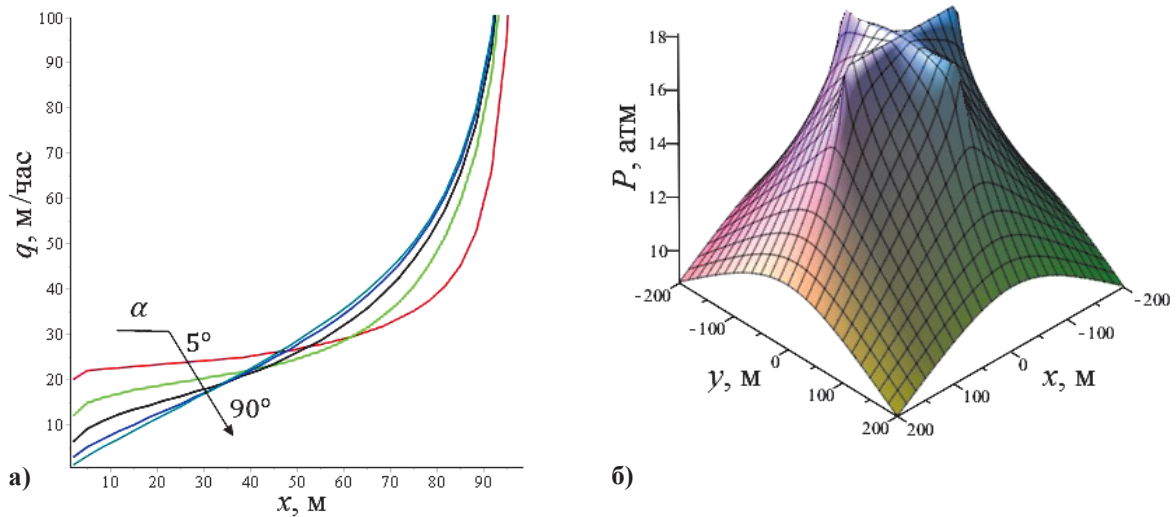


Рис. 5. Распределение притока вдоль первичной трещины (а) при постоянной депрессии в 40 атм при различных углах раскрытия и возмущение пластового давления (б) в окрестности скважины при взаимно перпендикулярном расположении трещин

конечной проницаемости при заданной депрессии. Из соотношения (8) при $x = 0$ непосредственно следует:

$$P_w = -\frac{\mu Q(t)}{4hx_f} \left[\int_0^{x_f} \frac{2\bar{q}(\xi)}{\pi k} \ln\left(\frac{\xi}{\sqrt{2.2458\kappa t}}\right) d\xi \right] =$$

$$= -\frac{\mu Q(t)}{2\pi khx_f} \left\{ \int_0^{x_f} \bar{q}(\xi) \left[\ln\left(\frac{\xi}{r_w}\right) - \ln\left(\sqrt{\frac{2.2458\kappa t}{r_w^2}}\right) \right] d\xi \right\},$$

где r_w – радиус скважины. В результате, продуктивность скважины будет задаваться формулой:

$$\frac{Q}{P_w} = \frac{2\pi hk}{\mu} \frac{1}{S + \ln\left(\sqrt{\frac{2.2458\kappa t}{r_w^2}}\right)}, \tag{9}$$

где псевдоскин-фактор равен:

$$S = -\frac{1}{x_f} \int_0^{x_f} \bar{q}(\xi) \ln\left(\frac{\xi}{r_w}\right) d\xi.$$

В частном случае одиночной трещины бесконечной проводимости ($\bar{q} = 1$) псевдоскин-фактор в (9) равен

$S = -\ln(x_f/e)$. Кроме того, согласно оценкам, полученным в (Чарный, 1963), на основе метода последовательной смены стационарных состояний, выражение $\sqrt{2.2458\kappa t}$ можно рассматривать как радиус подвижного текущего кругового контура питания r_e . В результате приведенное выше соотношение (9) может быть переписано в эквивалентной форме:

$$P_w = \frac{\mu Q}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_e}{x_f/e}\right),$$

которое совпадает с решением (Raghavan, Joshi, 1993).

Результаты расчета псевдоскин-фактора (9), представленные на рисунке 6, показывают, что минимальный псевдоскин-фактор и максимальный прирост объема закачки (притока) достигается при перпендикулярном расположении трещин и существенно зависит от их фильтрационного сопротивления.

Повторный гидравлический разрыв пласта позволяет увеличить псевдоскин-фактор при высокой проницаемости трещин до 5-10 %, как показано на рисунке 6а. Эффективность повторного гидроразрыва пласта согласно

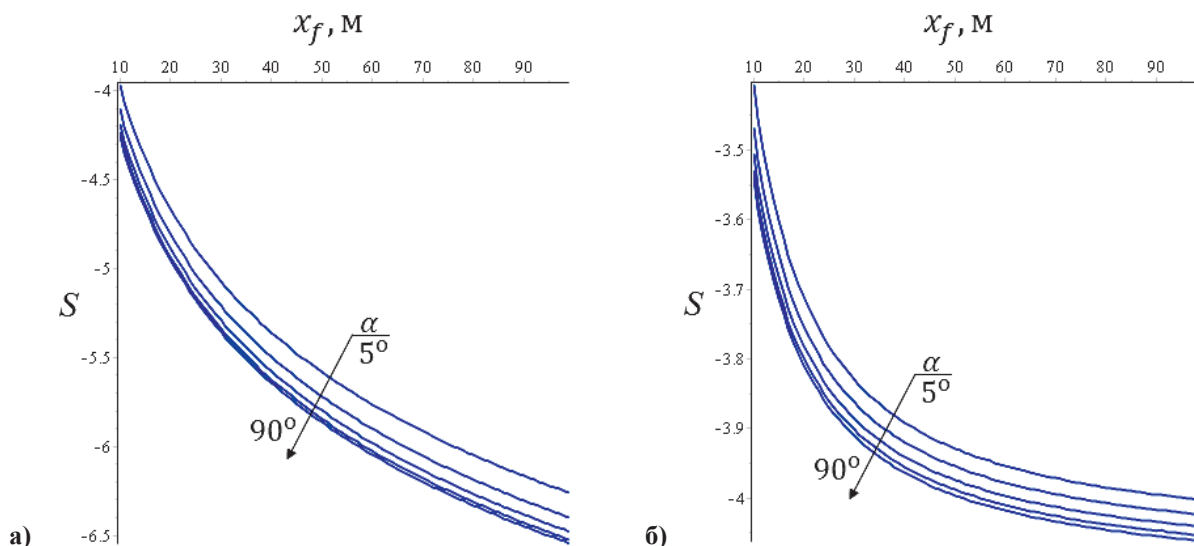


Рис. 6. Псевдоскин-фактор при заданном забойном давлении P_w с проницаемостью (а) – $k_f = 10^6$ мД ($kx_f / (k_f \delta_f) \sim 0,05$) и (б) – $k_f = 10^4$ мД ($kx_f / (k_f \delta_f) \sim 5$)

рисунку 6б возрастает до 10-20 % в случае небольшой проницаемости трещин, что согласуется с результатами численного решения, полученного в (Лихтарев, Пестриков, 2010).

Заключение

Как известно, гидравлический разрыв пласта – сложный, энергоемкий и дорогостоящий технологический процесс интенсификации разработки месторождений. С каждым годом все шире применяют данную технологию при эксплуатации как добывающих, так и нагнетательных скважин. Однако последствия применения повторного ГРП не всегда положительны, что делает актуальной задачу оценки его эффективности.

В рамках исследования гидродинамического режима скважины с пересекающимися трещинами, вскрывающими однородный пласт, показано, что при неизменных условиях эксплуатации скважины (постоянное давление на забое P_w или постоянный расход Q) устанавливается квазистационарный режим работы скважины с неизменным профилем закачки (притока) в трещинах. А распределение притока вдоль трещины существенно зависит от его относительного фильтрационного сопротивления, $kx_f/(k_f\delta_f)$. При этом с увеличением угла раскрытия градиенты давления в околоскважинной зоне пласта снижаются и уменьшается локальный отток (приток) жидкости. А на удаленной концевой части трещин наблюдается обратный эффект – плотность потока возрастает по причине снижения взаимовлияния между трещинами. Максимальный суммарный прирост притока в пласт достигается при перпендикулярном расположении трещин.

Повторный гидравлический разрыв продуктивного пласта позволяет увеличить псевдоскин-фактор при высокой проницаемости ($k_f \sim 10^6$ мД, $kx_f/(k_f\delta_f) \sim 0,05$) трещин до 5-10 %. Эффективность повторного гидроразрыва пласта возрастает до 10-20 % в случае небольшой проницаемости ($k_f \sim 10^4$ мД, $kx_f/(k_f\delta_f) \sim 5$).

Дальнейшее продолжение исследования может быть направлено на решение как более общих задач неустановившейся фильтрации, так и обратных задач: обоснования методик гидродинамического исследования скважин с целью определения угла раскрытия между двумя трещинами ГРП и других гидродинамических характеристик системы трещин.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю профессору А.Н. Саламатину за ценные советы при планировании и реализации исследования и рекомендации по оформлению работы. Также автор благодарит профессора Г.Т. Булгакову за выбор тематики и направления исследований и выражает признательность рецензенту за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению данной статьи.

Литература

- Абрамовиц М., Стиган И. (1979). Справочник по специальным функциям. Москва: Наука, с. 58-59.
- Карслоу Г., Егер Д. (1964). Теплопроводность твердых тел. Москва: Наука, с. 251-259.
- Лихтарев А.В., Пестриков А.В. (2010). Определение коэффициента продуктивности скважины, пересеченной двумя трещинами гидроразрыва пласта разного азимута, на основе математического моделирования. *Научно-технический вестник ОАО «НК» Роснефть*, с. 12-14.
- Морозов П.Е. (2016). Псевдоскин-фактор и оптимальная проводимость вертикальной трещины гидравлического разрыва пласта. *Межд. научно-практ. конф.: Инновации в разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений*, Казань, с. 53-56.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. (1999). Уравнения математической физики. Москва: МГУ, с. 477-485.
- Чарный И.А. (1963). Подземная гидрогазодинамика. Москва, Гостоптехиздат, с. 250-313.
- Sinco-Ley H., Samaniego V.F., Dominguez A.N. (1978). Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture. *SPE Journal*, 18(4), pp. 253-264.
- Economides M., Oligney R., Valkó P. (2002). Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Alvin, Texas: Orsa Press, 25 p.
- Meehan D. N., Horne R.N., Ramey H.J. (1989). Interference testing of finite conductivity hydraulically fractured wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*, pp. 137-152.
- Prats M. (1961). Effect of vertical fractures on reservoir behavior-incompressible fluid case. *SPE Journal*, 1(02), pp. 105-118.
- Raghavan R., Joshi S.D. (1993). Productivity of multiple drainholes or fractured horizontal wells. *SPE Form. Eval.*, 8(01), pp. 11-16.

Сведения об авторе

Юлия Ильиатовна Яхина – младший инженер-программист в инженерно-аналитической группе, отдел научных исследований, ООО «Термосим»
Россия, 420108, Казань, ул. Магистральная, 59/1
E-mail: vib-210@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2018;
Принята к публикации 28.04.2018;
Опубликована 30.06.2018

IN ENGLISH

Hydraulic fracturing efficiency evaluation in the vicinity of a single well for a reservoir with two fractures

Yu.I. Yakhina

Termosim LLC, Kazan, Russian Federation

Abstract. The solution of fluid flow problem in an unbounded homogeneous reservoir penetrated by a single well with two intersecting fractures with taking into account their hydrodynamic resistance is constructed and investigated. A general integral representation of the perturbed pressure field is obtained using the instantaneous point-source. As a particular case, the quasi-stationary operating mode of

the well is considered. The accuracy and limitations of the obtained asymptotic solutions are estimated. A comparative analysis obtained results is done. Well productivity and the pseudoskin factor for the fractures system are determined, explicit analytical expressions for these characteristics are constructed. In the course of computational experiments, the interaction of intersecting fractures at different opening

angles are investigated. An estimate of the efficiency of repeated hydraulic fracturing of the productive formation is obtained. It is shown that the maximum flow is achieved for a perpendicular arrangement of the fractures, and the distribution of the outflow (inflow) along the flat vertical fracture essentially depends on its relative filtration resistance.

Keywords: hydraulic fracturing, crack azimuth of repeated fracturing, efficiency of repeated fracturing, quasi-stationary operation of well, pseudoskin factor of repeated fracturing, filter resistance in cracks, instantaneous point-source, fracture hydrodynamics

Recommended citation: Yakhina Yu.I. (2018). Hydraulic fracturing efficiency evaluation in the vicinity of a single well for a reservoir with two fractures. *Georesursy = Georesources*, 20(2), pp. 108-114. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.2.108-114>

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the scientific adviser, Professor A.N. Salamatina for valuable advice in the planning and implementation of research and recommendations on the formatting of work. The author thanks Professor G.T. Bulgakova for choosing the topic and area of research and expresses gratitude to the reviewer for valuable comments and suggestions that contributed to the improvement of this article.

References

- Abramowitz M., Stegun A. (1979). Handbook of Mathematical Functions. Moscow: Nauka, pp. 58-59. (In Russ.)
- Carslaw H.S., Jaeger J.C. (1964). Conduction of Heat in Solids. Moscow: Nauka, pp. 251-259. (In Russ.)
- Charnyy I. A. (1963). Underground hydro gas dynamics. Moscow: Gostoptekhizdat, pp. 250-313. (In Russ.)

Cinco-Ley H., Samaniego V.F., Domínguez A.N. (1978). Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture. *SPE Journal*, 18(4), pp. 253-264.

Economides M., Oligney R., Valkó P. (2002). Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Alvin, Texas: Orsa Press, 25 p.

Lihtarev A. V., Pestrikov A. V. (2010). Opređenje koeficienta produktivnosti skvazhiny, peresechennou dvumua treshhinami gidrorazryva plasta raznogo azimuta, na osnove matematicheskogo modelirovaniua [Determination of the production efficiency of a well crossed by two induced hydraulic fractures of a different azimuth, based on mathematical modeling]. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik OAO "NK" Rosneft'*, pp. 12-14. (In Russ.)

Meehan D. N., Horne R.N., Ramey H.J. (1989). Interference testing of finite conductivity hydraulically fractured wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*, pp. 137-152.

Morozov P.E. (2016). Pseudoskin-faktor i optimal'naya provodimost' vertikal'noy treshhiny gidavlicheskogo razryva plasta [Pseudoskin factor and optimal conductivity of vertical induced hydraulic fracture]. *Mezhd. nauchno-prakt. konf.: Innovacii v razvedke i razrabotke nefyanyh i gazovyh mestorozhdeniy* [Proc. Sci. and Pract. Conf.: Innovations in exploration and development of oil and gas fields], Kazan, pp. 53-56. (In Russ.)

Prats M. (1961). Effect of vertical fractures on reservoir behavior-incompressible fluid case. *SPE Journal*, 1(02), pp. 105-118.

Raghavan R., Joshi S.D. (1993). Productivity of multiple drainholes or fractured horizontal wells. *SPE Form. Eval.*, 8(01), pp. 11-16.

Tikhonov A. N., Samarskii A. A. (1999). Equations of Mathematical Physics. Moscow: MSU, pp. 477-485. (In Russ.)

About the Author

Yulia I. Yakhina – Junior Software Engineer, Engineering-Analytical Group, Department of Scientific Research, Termosim LLC

59/1 Magistralnaya str., Kazan, 420108, Russian Federation

E-mail: vib-210@mail.ru

Manuscript received 29 January 2018;

Accepted 28 April 2018;

Published 30 June 2018